

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO

Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO
AERODINÁMICO MEDIANTE UNA
TÉCNICA EXPERIMENTAL APLICADA
A ENVOLVENTES ARQUITECTONICAS.**

Alberth Fabian Velasco Sandoval

Tesis para optar por el grado de Maestro en Diseño

Línea de Investigación Arquitectura Bioclimática

Miembros del Jurado:

Dr. César Augusto Real Ramírez

Director de la tesis

Dr. Jesús Isidro González Trejo

Co-Director de la Tesis

Mtra. Verónica Huerta Velázquez

Dr. Víctor Fuentes Freixanet

Dr. Guillermo Jarquín López

México, D.F.

Junio de 2013

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme cumplir mis sueños y darme la fuerza espiritual y emocional para alcanzar mis metas.

A mi madre Lucy María Sandoval Ocampo.

Madre, ahora entiendo que no fueron regaños, solo consejos con un tono diferente que con las experiencias vividas y los años se convierten en la mejor de las melodías, espero algún día poder transmitir tales acordes, con ese amor y elocuencia tal como tú me lo compartías, pero más que nada, por su amor.

A mi padre Aurelio Rodrigo Velasco Quijano, por haberme apoyado siempre y en todo momento; por sus consejos y la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero mas que nada por enseñarme una lección diaria de valores, humildad y sencillez, con esa particular forma de expresármelo me alegran los días.

A Hamer Rodrigo Velasco Sandoval y Marcela Velasco Sandoval.

Por regalarme su compañía, su comprensión y ser un ejemplo de superación ante las dificultades de la vida; espero poder tenerlos muchos años a mi lado para poder compartir sus alegrías y verlos alcanzar sus sueños.

A mi sobrina Marianita por llenarme de alegría y motivarme a salir adelante.

A mi familia y amigos, por el apoyo constante y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a ustedes!

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco el apoyo recibido durante el proceso de formación e investigación de la Maestría en Diseño, Línea de Investigación Arquitectura Bioclimática, al Departamento de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el diseño (CyAD), al Departamento de Sistemas de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI), al Laboratorio de Cómputo Científico y al Laboratorio de Diseño Bioclimático donde se llevaron a cabo los cálculos numéricos de los trabajos presentados y los experimentos físicos de esta tesis.

En especial mis tutores y asesores, al Dr. César Augusto Real Ramírez y al Dr. Jesús Isidro González Trejo, a la Mtra. Verónica Huerta Velázquez y a la M. en C. Rosalba Orduña Martínez, quienes me manifestaron un apoyo constante en todas las etapas de la Investigación y sobre todo las palabras de aliento y ánimo que me brindaron en los momentos difíciles.

También a mi pequeña gran familia en México por todo su apoyo, Johanna Apolo, Cecilia González, Tania Ramírez, Paul Pérez, Alexandra Cruz, Cristina Lozano, Alejandro Morales, Laura Guarneros, Carmen, Yoshiaki Ando.

RESUMEN

En la presente tesis se presenta una metodología de análisis para el comportamiento del flujo en los alrededores de una envolvente arquitectónica en donde se utiliza un túnel aerodinámico como herramienta fundamental para controlar las condiciones de las pruebas.

La caracterización del túnel aerodinámico fue el punto de partida para proponer la escala de los modelos físicos. La escala de los modelos es 1:50, el material utilizado para la elaboración de las representaciones a escala es acrílico translucido de 0.003 metros de espesor.

La selección del material fue basado en las propiedades ópticas que favorecen la visualización del flujo de aire en la zona de pruebas. Todos los modelos están montados en una base también construida en acrílico. El conjunto se colocó sobre una base de vidrio de 0.005 metros de espesor graduada al ancho de la vivienda con la finalidad de formar un plano sobre la envolvente que facilitara la interpretación de los resultados.

La selección de la fuente de iluminación es una de las innovaciones que se realizaron en esta tesis, si se compara con los resultados reportados en la literatura especializada.

La iluminación en general es un plano de luz de espesor cercano a 0.0005 metros que delimita una región en los alrededores del volumen de control con la finalidad de estudiar únicamente un plano.

La naturaleza tridimensional del fenómeno de flujo alrededor de una envolvente es compleja, sin embargo la técnica experimental permite estudiar con la ayuda de una cámara de alta velocidad las diferentes condiciones del flujo en un instante de tiempo.

Después de garantizar la reproducibilidad de las pruebas asegurando la semejanza geométrica, cinemática y dinámica en su conjunto, es posible afirmar que la técnica no se considera intrusiva y permite estudiar con precisión el comportamiento cualitativo de las propuestas de diseño dentro del túnel.

La interpretación de los resultados resalta las ventajas que ofrece la técnica sobre los sistemas de visualización convencionales. Además es una herramienta que puede ser utilizada en modelos en escala real de manera económica y factible.

ABSTRACT

A methodology to analyze the behavior of the flow around an architectural construction in a wind tunnel is presented as a fundamental tool in order to control the operational conditions.

The initial work was the characterization of the wind tunnel to scale the physical models and was defined as 1:50. The material used in the construction of the scaled models is translucent acrylic of 0.003 meters thick.

Materials selection was based on the optical properties of the selected material that facilitates the visualization of the air flow in the test area of the wind tunnel. All models was positioned on a base built in acrylic. The assembly was placed on a glass with a 0.005 meters of thickness; the structure has adjusted to the width of the tunnel to avoid the influence of the internal walls, to construct a plane to facilitate the visualization and moreover the interpretation of the results.

The selection of the light source is one of the innovations presented on this thesis. Basically, the plane of light is near 0.0005 meters thick, that defines a region around the control volume in order to study only one plane.

The three dimensional nature of the flow around a geometry phenomenon is complex. However, it is possible to study by using the proposed experimental technique and a high speed camera at different operational conditions.

One of the objectives in this work is to ensure the reproducibility of the test base on the geometric, kinematic and dynamic similarity criteria. It is possible to consider the as non-intrusive technique; moreover it is possible to study the qualitative nature of the fluid around a building, to propose several bioclimatic designs of architectural geometries and to evaluate the cases within the wind tunnel.

The interpretation of the results highlights the advantages of the method over the conventional visualization techniques. It is also consider as a tool that can be used in scaled models.

Contenido

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
CAPITULO I ESTUDIO DE LA AERODINÁMICA EN LAS ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO A.....	10
1.5. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO B.....	14
1.6. OBJETIVO GENERAL	19
1.7. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
1.8. HIPÓTESIS.....	20
1.9. APORTE AL DISEÑO	21
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. INTRODUCCIÓN	23
2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	23
2.3. DINAMICA DE FLUIDOS	32
2.4. CRITERIOS DE SIMILITUD.....	39
2.5. HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES	41
CAPITULO III METODOLOGÍA.....	53
3.1. INTRODUCCIÓN	53
3.2. ESTRUCTURA DE LA BASE DE LA TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN .	54
3.3. MODULACIÓN.....	56
3.4. FUENTE DE ILUMINACIÓN Y PLANOS DE ILUMINACIÓN.....	59
3.5. TRAZADO DEL GRID EN ALZADO.....	61
3.6. INSTRUMENTOS Y EQUIPO DE VISUALIZACIÓN	65

3.7. SISTEMA DE ILUMINACIÓN:.....	70
CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS	73
4.1. INTRODUCCIÓN	73
4.2. CASO DE ESTUDIO A.....	77
4.3. CASO DE ESTUDIO B.....	107
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
5.1. CONCLUSIONES	139
5.2. RECOMENDACIONES	140
REFERENCIAS.....	143
CURRICULUM VITAE.....	145
ANEXOS	151

Índice de Figuras

Figura 1 Incidencia solar sobre la superficie terrestre [1]	1
Figura 2 Corrientes de aire en la atmósfera	2
Figura 3 Análisis experimental del aire alrededor de un grupo de edificaciones	3
Figura 4 Vivienda particular habitada y número de hogares en México (1980-2010) [5]	7
Figura 5 Proyecciones estudio 2011 [7]	8
Figura 6 Estimación del crecimiento de la vivienda en México [7].....	10
Figura 7 Planta baja del Modelo A.	11
Figura 8 Planta alta del Modelo A.	12
Figura 9 Cortes longitudinal y transversal del modelo A.	13
Figura 10 Modelo físico a escala construido en acrílico (a) vista frontal y (b) vista posterior	13
Figura 11 Vista en planta del modelo físico construido en acrílico	14
Figura 12 Consideraciones bioclimáticas en la planta baja del modelo B	15
Figura 13 Consideraciones bioclimáticas en la planta alta del modelo B	16
Figura 14 Corte longitudinal y transversal del modelo B	16
Figura 15 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-oeste del modelo B..	17
Figura 16 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-oeste del modelo B..	17
Figura 17 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-este y noroeste del modelo B	18
Figura 18 Fotografía del modelo a escala en vista superior del modelo B	18
Figura 19 Fotografía del modelo a escala en vista frontal del modelo B	19
Figura 20 Diferencia del comportamiento entre fluidos viscosos y no viscosos en una pared [9].	25
Figura 21 Formación de caminos de vórtices de Von Kármán [12]	28
Figura 22 Espesor de la capa límite [13].	30
Figura 23 Caminos de vórtices de von Kármán [14].	31
Figura 24 Túnel aerodinámico utilizado por los hermanos Wright [17]	42
Figura 25 Diagrama esquemático de un túnel de circuito abierto.....	43
Figura 26 Fotografía aérea tomada de las instalaciones de Ferrari en Italia.....	44
Figura 27 Manómetro inclinado[19]	45
Figura 28 Sensores de presión instalados en el túnel aerodinámico	46
Figura 29 Experimento con un modelo a escala	49
Figura 30 Laboratorio con un instrumento PIV en el NIST en E.U. [20]	49
Figura 31 Partículas trazadoras [20]	50
Figura 32 Casos de estudio construidos en acrílico	53
Figura 33 Zona de pruebas del túnel aerodinámico	54

Figura 34 Perfiles de velocidad en el túnel aerodinámico de la UAM A [17]	55
Figura 35 Alineación de ejes verticales para los módulos de soporte estructural .	57
Figura 36 Alineación de ejes horizontales para los módulos de soporte estructural	57
Figura 37 Alineación de ejes en vertical	58
Figura 38 Orden de pruebas para determinar la altura de la base de la técnica experimental.....	59
Figura 39 Medidas adimensionales del modelo físico tridimensional	59
Figura 40 Trazado en planta del grid en horizontal	60
Figura 41 Trazado en planta del grid en vertical	61
Figura 42 Trazado del grid en alzado al interior del túnel aerodinámico	61
Figura 43 Eje central de iluminación	62
Figura 44 Planos de iluminación.	63
Figura 45 Ejes de iluminación en perspectiva	63
Figura 46 Regiones de análisis del flujo del aire sobre los prototipos	64
Figura 47 Cámara de alta velocidad.....	67
Figura 48 Equipo de captura de imagen	68
Figura 49 Ejes de orientación de los dispositivos de captura de imagen	69
Figura 50 Sistema de ejes de visualización 4 y 5 dentro del túnel aerodinámico..	70
Figura 51 Dimensiones de la fuente lumínica.....	72
Figura 52 Regiones de análisis en el modelo A.	74
Figura 53 Sub-regiones de análisis en el modelo A.	75
Figura 54 Ejes de referencia en el modelo A.....	76
Figura 55 Flujo completamente desarrollado en modelo A.	77
Figura 56 Comportamiento del flujo de aire en el modelo A.....	78
Figura 57 Descenso del flujo de aire y formación vórtice A del modelo A.....	78
Figura 58 Movimiento elíptico Vórtice A del modelo A.	79
Figura 59 Desplazamiento en espiral o vórtice A del modelo A.	79
Figura 60 Colisión del la trayectoria del aire sobre el estancamiento del modelo A.	80
Figura 61 Ascenso de aire sobre el estancamiento de aire del modelo A.....	80
Figura 62 Tercera línea de flujo del modelo A.....	81
Figura 63 Flujo envolvente del vórtice B e inicio del vórtice C del modelo A.....	81
Figura 64 Agrupación del vórtice B, con la formación del vórtice C del modelo A.	82
Figura 65 Fusión de flujo y formación del vórtice C del modelo A.....	82
Figura 66 Flujo ascendente sobre la fachada del modelo A.....	83
Figura 67 Flujo de aire en ascenso sobre la fachada del modelo A.	84
Figura 68 Región de análisis 2 del modelo A.	84
Figura 69 Flujo de aire con trayectoria descendente en la región 2 del modelo A.	85
Figura 70 Flujo de aire con formación helicoidal en zona 2 del modelo A.....	85
Figura 71 Flujo helicoidal o formación del vórtice D del modelo A.	86

Figura 72 Trayecto del flujo D sobre el estancamiento del modelo A.....	87
Figura 73 Unión de los vórtices D y E del modelo A.	87
Figura 74 Flujo en espiral horizontal del vórtice E del modelo A.	88
Figura 75 Colisión del Flujo E con formación F del modelo A.	88
Figura 76 Flujo F rebasando estancamientos de aire del modelo A.....	89
Figura 77 Trayectoria de la corriente de aire (F) del modelo A.	89
Figura 78 Región (B) vista aérea en ángulo 90° del modelo A.....	90
Figura 79 Trayectoria de flujo sobre la región (B) del modelo A.....	91
Figura 80 Formación del vórtice (G) del modelo A.	92
Figura 81 Formación del vórtice (G) en la región (B) del modelo A.....	93
Figura 82 Vórtice (G) completamente desarrollado del modelo A.	93
Figura 83 Desplazamiento del vórtice (G) del modelo A.	93
Figura 84 Colisión vórtice (G) con un estancamiento de aire del modelo A.	94
Figura 85 Unión del vórtice (G) con estancamiento de aire del modelo A.....	95
Figura 86 Desplazamiento del vórtice sobre la región B del modelo A.	95
Figura 87 Región de análisis de la región B del modelo A.	96
Figura 88 Trayectoria del flujo en la región A del modelo A.	97
Figura 89 Formación del vórtice H del modelo A.....	97
Figura 90 Desplazamiento del vórtice H del modelo A.	98
Figura 91 Colisión del vórtice (H) con el estancamiento de aire del modelo A.....	99
Figura 92 Fusión del vórtice (H) con el estancamiento del modelo A.....	99
Figura 93 Vórtice (H) rebasando el límite de la región A.	100
Figura 94 Desplazamiento del vórtice sobre la región A.	100
Figura 95 Región 3 del modelo A.	101
Figura 96 Convergencia de vórtices H y G del modelo A.....	103
Figura 97 Origen del camino de vórtices de von Kármán en una envolvente arquitectónica del modelo A.	104
Figura 98 Interacción entre los vórtices J y L del modelo A.	105
Figura 99 Alineamiento del vórtice J y I del modelo A.....	106
Figura 100 Sobrepaso del vórtice J al vórtice I del modelo A.....	106
Figura 101 Evolución de los vórtices I y J del modelo A.	107
Figura 102 Flujo de aire en la región 1 del modelo B.	108
Figura 103 Flujo del aire sobre la región 1 del modelo B.	108
Figura 104 Movimiento descendente del flujo de aire del modelo B.	109
Figura 105 Formación del vórtice A del modelo B.....	109
Figura 106 Movimiento ascendente sobre eje X1 del modelo B.....	110
Figura 107 Movimiento descendente en X1 del modelo B.	110
Figura 108 Movimiento ascendente en el eje X1 del modelo B.....	111
Figura 109 Colisión y movimiento ascendente en X1 del modelo B.....	111
Figura 110 Movimientos del flujo ascendentes y descendentes en X1 del modelo B del modelo B.	112

Figura 111 Trayectoria del flujo aire sobre un vórtice del modelo B.....	113
Figura 112 Trayectoria del flujo del aire sobre el estancamiento del modelo B...	113
Figura 113 Descenso del flujo vórtice B sobre el estancamiento de aire del modelo B.....	114
Figura 114 Tercera línea de flujo e inicio vórtice C del modelo B.....	114
Figura 115 Flujo envolvente e inicio vórtice C del modelo B.	115
Figura 116 Finalización del vórtice C del modelo B.....	115
Figura 117 región 2 del volumen B.....	116
Figura 118 Interacción de las líneas de flujo en la región 2 del modelo B.....	117
Figura 119 Formación del vórtice (D) en la región 2 del modelo B del modelo B.	118
Figura 120 Formación del vórtice (F) en la región 2 del modelo B del modelo B.	119
Figura 121 Colisión con estancamiento de aire de los vórtices (D), (E), (F) del modelo B.	120
Figura 122 comportamiento de los vórtices en la zona B del modelo B.....	120
Figura 123 Región 2, Subregiones de análisis 2A y 2B del modelo B.....	121
Figura 124 Región 2 subregión A (2A) del modelo B	122
Figura 125 Desplazamiento del flujo sobre la región (2A) del modelo B.	123
Figura 126 Formación del vórtice (G) en la región (2A) del modelo B.....	124
Figura 127 Formación del vórtice (H) (I) en la región 2A del modelo B.....	125
Figura 128 Fusión de estancamientos de aire con los vórtices (H), (I).....	126
Figura 129 Desplazamiento de los vórtices (G), (H), (I) sobre el plano horizontal de la fachada izquierda del modelo B.	126
Figura 130 Desarrollo de los vórtices (G), (H), (I) sobre el plano horizontal de la fachada izquierda del modelo B	127
Figura 131 Región de análisis 2 B del modelo B.....	128
Figura 132 Desplazamiento de las líneas de aire sobre la región 2B.....	129
Figura 133 Formación de los vórtices D y E del modelo B.	130
Figura 134 Colisión del vórtice D y E con el estancamiento del modelo B.	131
Figura 135 Fusión del vórtice (D) con el (E) en la región 2B del modelo B.	132
Figura 136 Formación del vórtice D" y desplazamiento del vórtice F sobre la región 3 del modelo B.	133
Figura 137 Ingreso de los vórtices F y I a la región 3 del modelo B.	134
Figura 138 Formación de los caminos de von Kármán del modelo B.	135
Figura 139 Desplazamiento paralelo de los vórtices F y I del modelo B.	136
Figura 140 Desarrollo de los vórtices en la región C del modelo B.	137

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de vivienda por precio promedio [8]	9
Tabla 2 Especificaciones de la fuente lumínica.....	72

CAPITULO I ESTUDIO DE LA AERODINÁMICA EN LAS ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS

1.1. INTRODUCCIÓN

El viento es el desplazamiento horizontal de las masas de aire causado por las diferencias de presión atmosférica, por la variación de temperaturas sobre las diversas partes de la superficie terrestre, es decir, mientras una parte del globo terráqueo recibe la radiación directa, la otra mitad se enfría a causa de la difusión nocturna hacia el espacio como se muestra en la Figura 1.

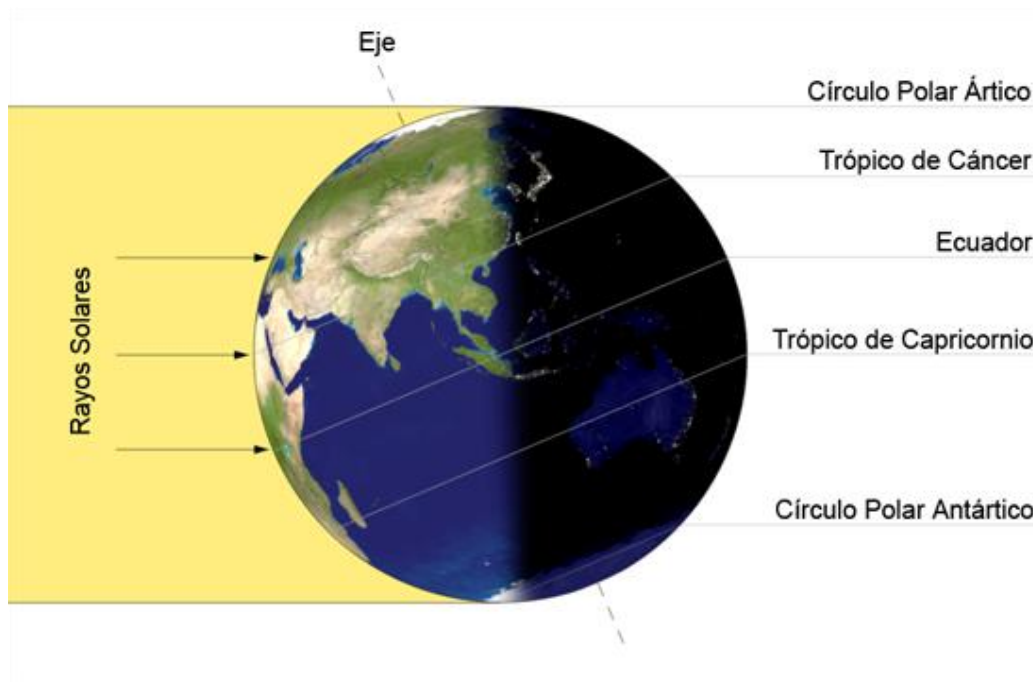


Figura 1 Incidencia solar sobre la superficie terrestre [1]

El efecto de giro que observamos del viento visto desde el espacio, puede observarse como una compensación al giro de la tierra sobre su propio eje, sin embargo, el movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol también tiene un efecto de giro sobre el viento que estamos analizando.

Las masas de aire caliente en la atmósfera tienden a ascender y este lugar es ocupado por masas de aire circundante más frío y denso, los movimientos en

sentido vertical son llamados “corrientes de convección”. Cuando el aire esta en movimiento se denomina viento.

En la Figura 2 se observa la trayectoria del viento en la atmósfera, debido a la interacción del aire con la superficie y a la diferencia de temperaturas que existe en la atmósfera.



Figura 2 Corrientes de aire en la atmósfera

El estudio de la dirección del viento es un estudio complejo debido a que tenemos que considerar la interacción con la superficie terrestre, la diferencia de temperaturas, las tormentas solares, la distancia de la tierra y el sol, las islas de calor entre otras.

La rotación de la tierra y la aerodinámica

El efecto Coriolis nos indica cómo podemos observar el sentido de giro del viento con respecto a los hemisferios norte y sur [2]. Por otro lado cuando las corrientes de aire se entrecruzan producen giros y cambios de sentido, a este fenómeno se puede denominar turbulencia.

La turbulencia se debe fricción y choque del viento con algún elemento, ya sea natural o arquitectónico [3].

En un entorno urbano se forman turbulencias en el viento, al incidir sobre la morfología de la ciudad, la ciudad está compuesta por edificaciones verticales y horizontales que se agrupan formando manzanas, integradas entre sí por calles y avenidas. Al colisionar el aire sobre esta morfología se desvía y cambia la dirección del flujo de aire.

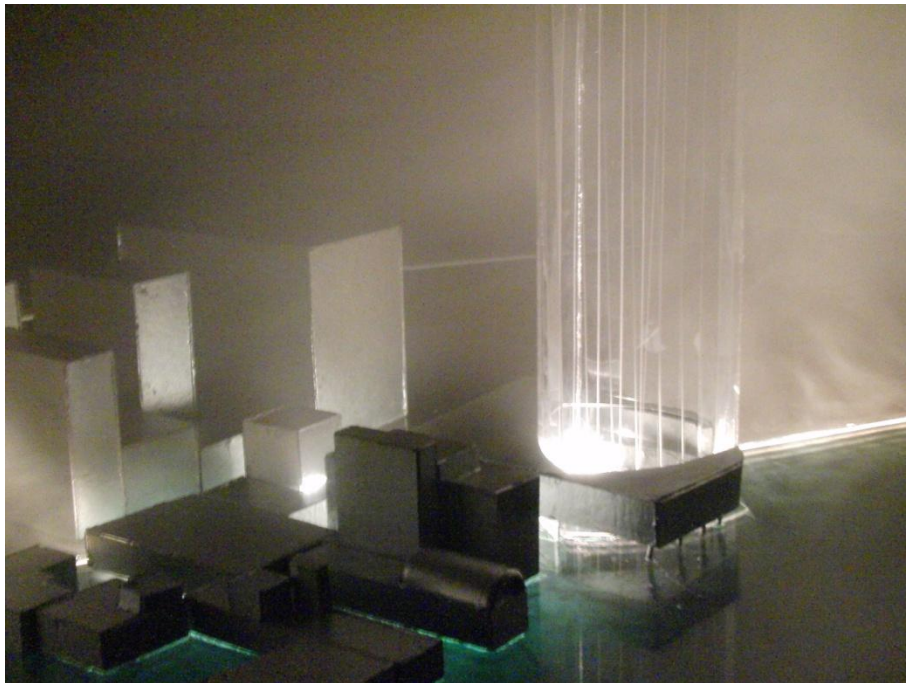


Figura 3 Análisis experimental del aire alrededor de un grupo de edificaciones

En algunas ciudades como el Distrito Federal se generan inesperadas turbulencias causadas por los llamados domos térmicos, que son fenómenos generados por factores como la morfología geométrica de la envolvente

arquitectónica, las texturas de la superficie, la variedad de materiales y las grandes masas de edificaciones que reciben la radiación solar directa e incluso los niveles de contaminación.

El efecto convectivo sobrecalienta el aire y las partículas en suspensión, creando cambios continuos de velocidad y dirección del los patrones de viento en un entorno urbano [4].

Con la formación de los domos térmicos, se genera un efecto nocivo de invernadero, que en algunos periodos se prolonga y altera fuertemente las condiciones climatológicas del lugar. Esta condición pone en riesgo la salud de las personas que se encuentran en la zona de influencia.

Este fenómeno también ha causado que la temperatura promedio de un lugar, bajo estas condiciones ambientales se incremente aproximadamente de 3 a 3.5° C, la consecuencia negativa de este fenómeno en las personas es una disminución en la calidad de vida [4].

La calidad de vida y el confort

Las personas buscan de forma intuitiva un lugar donde exista una temperatura adecuada, es decir, una temperatura alta sin llegar a sofocarse y no tan baja para llegar a la hipotermia, generalmente los seres humanos buscan un equilibrio térmico entre las condiciones atmosféricas y las condiciones del cuerpo humano.

Dependiendo de la edad de cada persona y las condiciones atmosféricas pueden sufrir cambios, ya que depende de la percepción que cada individuo tenga en un momento dado. Sin embargo cuando se alcanzan estas condiciones se puede hablar de un parámetro de confort.

En la actualidad se reconoce que existen diferentes percepciones y algunos de los ejemplos son la iluminación de un espacio, la acústica de un auditorio, la temperatura en un aula. Cuando se alcanzan las condiciones de equilibrio se puede definir un confort lumínico, acústico y térmico respectivamente.

Para generar los parámetros de confort en las edificaciones es primordial desarrollar un análisis de la región y en base a este análisis se plantean estrategias de diseño bioclimático.

Una de las herramientas más importantes para implementar de manera exitosa las estrategias bioclimáticas es el túnel aerodinámico. En esta instalación es posible representar y visualizar las particularidades de los fenómenos en condiciones controladas.

Con los datos recopilados de las visualizaciones y mediciones en el túnel se puede plantear diferentes tecnologías que involucran elementos en movimiento y estáticos.

En este trabajo se plantea una metodología de estudio del aire en condiciones controladas y que interactúa con un entorno urbano específico. Esta metodología considera el análisis de la interacción del aire con un elemento arquitectónico a través de imágenes.

La investigación consiste en un experimento montado sobre un túnel aerodinámico para implementar una técnica de visualización. El túnel es una herramienta que se ubica en el Laboratorio de Bioclimática del Departamento de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El viento pasa a través de diferentes geometrías, estas pueden ser naturales como las montañas, arboles y demás elementos de la naturaleza y las que son creadas por el hombre. Estas geometrías tienen una amplia diversidad en sus dimensiones y formas de sus envolventes.

Al pasar a través de estas geometrías, el viento interactúa y ocupa el volumen disponible. El viento es un flujo que nos rodea y es imperceptible debido a que no se puede observar a simple vista sin embargo es el medio en donde la temperatura, la humedad cambian.

Para facilitar el estudio de la interacción entre las geometrías y el viento se propone una metodología experimental para visualizar el fenómeno en estado no estacionario y que será dividido en dos el flujo exterior y el flujo interior.

El estudio consiste en alcanzar una técnica de visualización innovadora para estudiar dentro de un túnel aerodinámico, el flujo de aire que pasa a través de una edificación arquitectónica en diferentes condiciones de operación.

La propuesta considera generar las condiciones necesarias del flujo de aire en el túnel aerodinámico de baja velocidad que se encuentra en el Laboratorio de Bioclimática del Departamento de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, para evaluar el desempeño aerodinámico en modelos de vivienda básica.

Se llevara a cabo el análisis aerodinámico en las viviendas cuya demanda va en crecimiento en relación directa a la población, por lo que la vivienda es una necesidad prioritaria. Para satisfacer la demanda de vivienda, los desarrolladores plantean viviendas con condiciones básicas y carentes de un nivel de confort adecuado. Es por ello que en este análisis aerodinámico se plantean modelos de vivienda con envolventes arquitectónicas básicas, las cuales contienen estrategias para alcanzar el confort en las vivienda actuales en México.

Se plantean dos modelos de envolventes geométricas arquitectónicas de vivienda y nos referiremos a ellos como el modelo A y B.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La vivienda es una prioridad para los seres humanos y debe generar condiciones dignas de habitabilidad en las que los espacios y materiales proporcionen protección de los factores atmosféricos y su vez generen condiciones de confort.

Las condiciones de confort decrecen con el paso del tiempo debido a la degradación de los materiales, la aglomeración y reducción de los espacios son aspectos que principalmente afectan los parámetros de confort.

El crecimiento de la población trae consigo retos para los usuarios de una vivienda ya que es necesario re-adaptar un volumen fijo a un mayor número de habitantes. Los desarrolladores de vivienda han propuesto la construcción de espacios modulares que permitan que en un menor espacio físico puedan realizarse múltiples actividades, sin embargo es necesario reconocer que aún estas propuestas no resuelven las demandas de confort de un ser humano.

Otra variable que afecta notablemente los parámetros de confort es el incremento de los precios de la vivienda en su conjunto. Esta situación tiene origen el fenómeno de oferta-demanda que en el caso de los entornos urbanos se agudiza notablemente.

El fenómeno del crecimiento de la vivienda en México durante los últimos 30 años (1980 -2010) según la CONAPO es de 16.5 millones de unidades habitacionales. La unidad habitacional es aquel inmueble habitado hasta por dos personas adultas y un menor de edad.

El número de hogares es de 15.8 millones, donde el hogar está constituido por un numero de 4.5 habitantes en promedio. Esta condición se puede observar gráficamente en la Figura 4.

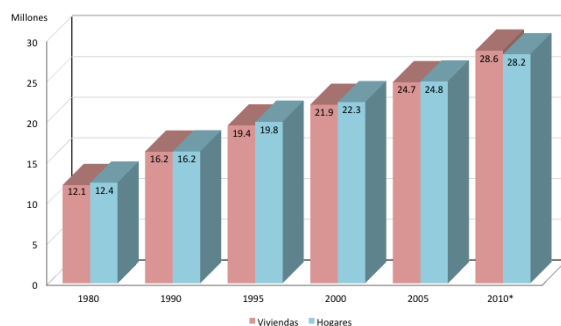


Figura 4 Vivienda particular habitada y número de hogares en México (1980-2010) [5]

En la Figura 9 se muestra un incremento en un periodo de 5 años de 3.9 millones de unidades de vivienda aproximadamente que representa el 16%. para el caso de los hogares, en el mismo periodo el incremento es de 3.4 millones de hogares que representa 14% aproximadamente.

Aun cuando la vivienda debe crecer en relación directa con el crecimiento poblacional, históricamente el gobierno tiene un rezago en esta materia debido a la falta de inversión de unidades habitacionales en su conjunto. El rezago habitacional real es de 380 mil viviendas por año, de acuerdo con el documento titulado "Rezago Habitacional" [6].

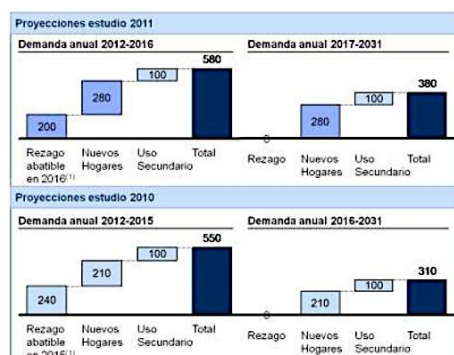


Figura 5 Proyecciones estudio 2011 [7]

En la Figura 5 se muestra que la demanda anual de vivienda es una variable que se descompone en tres, el rezago abatible, los nuevos hogares y el uso secundario. La primera componente, el rezago abatible es la más sensible desde el punto de vista social y generalmente es requerida por un sector de la población con un ingreso económico bajo, por lo que es necesario cubrir esta demanda mediante la vivienda de interés social. Este tipo de vivienda ha llevado a los desarrolladores a plantear sistemas de unidades que cuentan con un gran número de viviendas, en una superficie mínima.

El propósito de estudiar un caso representativo de la vivienda de interés social es para entender el comportamiento específico de los componentes que la integran y posteriormente hacer un planteamiento específico y evaluarlo a un grupo de viviendas en una distribución típica de este tipo de vivienda. Esta etapa del estudio se realizará en un trabajo posterior.

Los perfiles de vivienda que se edifican en la actualidad son caracterizados y planteados por el código de edificación de vivienda, el cual está basado en indicadores tales como: el precio final en el mercado, la forma de producción y la

superficie construida, la información de la Tabla 1 determina la siguiente clasificación:

- I. Clasificación por precio: *Toma como fundamento el precio y la forma de producción de la vivienda. La vivienda se clasifica en económica, popular y tradicional, llamadas comúnmente como viviendas de interés social, así como las viviendas media, residencial y residencial plus, construyéndose en conjuntos habitacionales y fraccionamientos.*
- II. Clasificación por forma de construcción: *La construcción de vivienda puede ser por encargo a desarrolladores privados o por autoconstrucción”.*

Promedios	Económica	Popular	Tradicional	Media	Residencial	Residencial Plus
Superficie construida promedio	30 m2	42.5 m2	62.5 m2	97.5 m2	145 m2	225 m2
Costo promedio:						
Veces Salario Mínimo Mensual del D.F (VSM/MDF)	Hasta 118	De 118.1 a 200	De 200.1 a 350	De 350.1 a 750	De 750.1 a 1,500	Mayor de 1,500
Número de cuartos	Baño Cocina Área de usos múltiples	Baño Cocina Estancia-comedor De 1 a 2 recámaras	Baño Cocina Estancia-comedor De 2 a 3 recámaras	Baño ½ baño Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 3 a 4 recámaras Cuarto de Servicio Sala familiar	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 3 a más recámaras De 1 a 2 cuartos de servicios Sala familiar

Tabla 1 Clasificación de vivienda por precio promedio [8]

La vivienda con mayor demanda en el mercado actual y hasta el 2030, según estimaciones del CONAVI, será la de interés popular con un 70% de incremento anual, seguido de la vivienda tradicional con un 36%, la residencial con un 9% y la residencial plus con el 4%, ver Figura 6 Estimación del crecimiento de la vivienda en México.

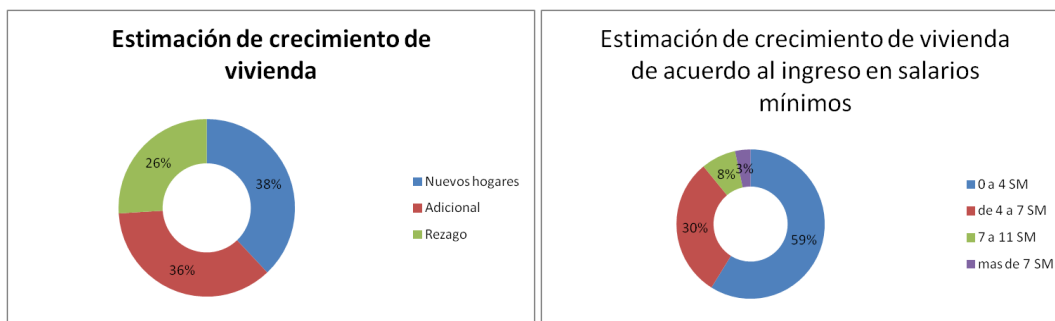


Figura 6 Estimación del crecimiento de la vivienda en México [7]

En el proceso de mitigar la demanda de la vivienda en México, como se mencionó anteriormente, los desarrolladores han optado por proyectar modelos de vivienda con espacios mínimos habitables, con el fin de agrupar un mayor número de unidades que conformaran fraccionamientos de vivienda. En estas proyecciones de vivienda los diseñadores ignoran las caracterizaciones climáticas y el entorno circundante, promoviendo condiciones adversas de bienestar y confort.

Esta condición obliga a los ocupantes a buscar en los equipos mecánicos y eléctricos los parámetros de confort, esta situación conlleva de forma inmediata al incremento en insumos energéticos, sin embargo se desestima la dependencia energética innecesaria.

El consumo excesivo de los recursos energéticos, ha generado una devastación del planeta, llevándonos a explorar otras alternativas como el caso de las energías renovables; entre ellas encontramos la energía solar, la biomasa y la energía eólica.

Según las estadísticas, la vivienda que tendrá un mayor crecimiento en el mediano y largo plazo será la vivienda popular, es por ello que el presente estudio utiliza un modelo básico.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO A

El modelo A cuenta con un área construida de 60.0 m^2 , la altura entre pisos es de 2.5 metros, los espacios habitables son: sala, comedor, cocina, área de lavado, jardín, dos recamaras y dos baños. Entre las consideraciones bioclimáticas

básicas se aplican la masividad, el control solar y los dispositivos de control solar. A continuación se presenta la Figura 7 que muestra la planta baja del modelo A.

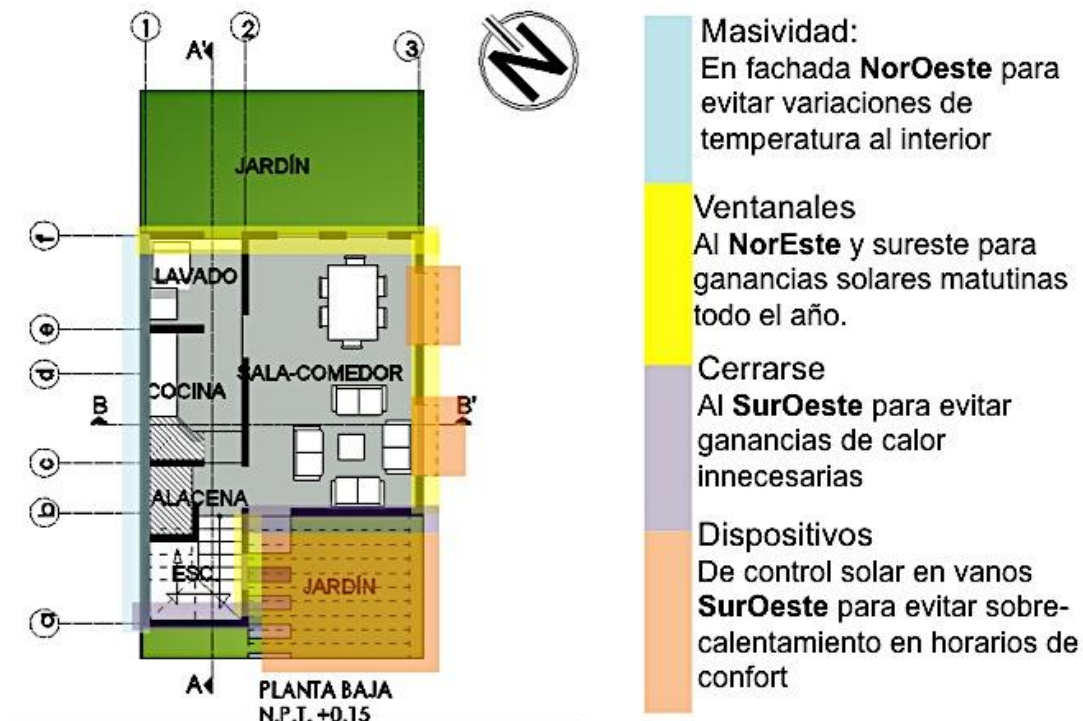


Figura 7 Planta baja del Modelo A.

En la Figura 8 se muestra la distribución de espacios arquitectónicos en la planta alta del modelo A junto con las consideraciones realizadas al mismo. En este caso de estudio se considerará que el modelo no se encuentra con ninguna colindancia. Para efectos del análisis solamente se estudiará el comportamiento del aire alrededor de la vivienda. Asimismo se considerará que el viento tiene una magnitud de velocidad constante a lo largo del experimento.

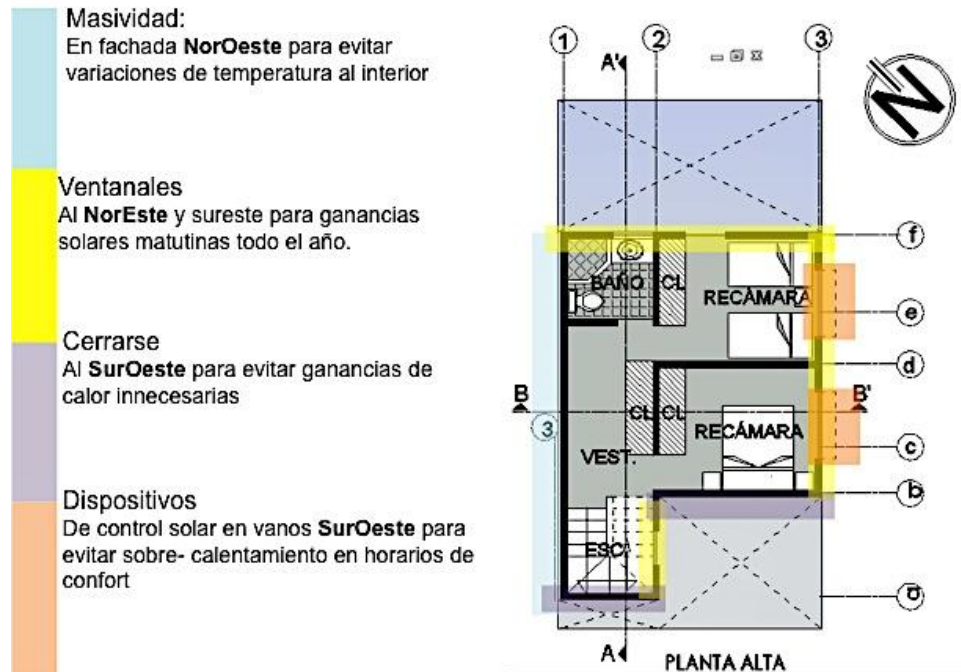


Figura 8 Planta alta del Modelo A.

En la Figura 9 se muestra los cortes longitudinal y transversal del modelo A y se destacan las consideraciones bioclimáticas utilizadas para mejorar el confort dentro de la vivienda.

La Figura 10 presenta las vistas frontal y posterior del modelo tridimensional construido en un material de acrílico translucido a escala 1:50. El espesor de la hoja de acrílico de donde se cortaron las piezas es de tres milímetros. La representación incluye, la vivienda de dos niveles y un cubo que representa las escaleras de la vivienda. Este modelo se encuentra sobre una base construida también de acrílico y el conjunto está montado sobre una base de vidrio dentro del túnel aerodinámico.

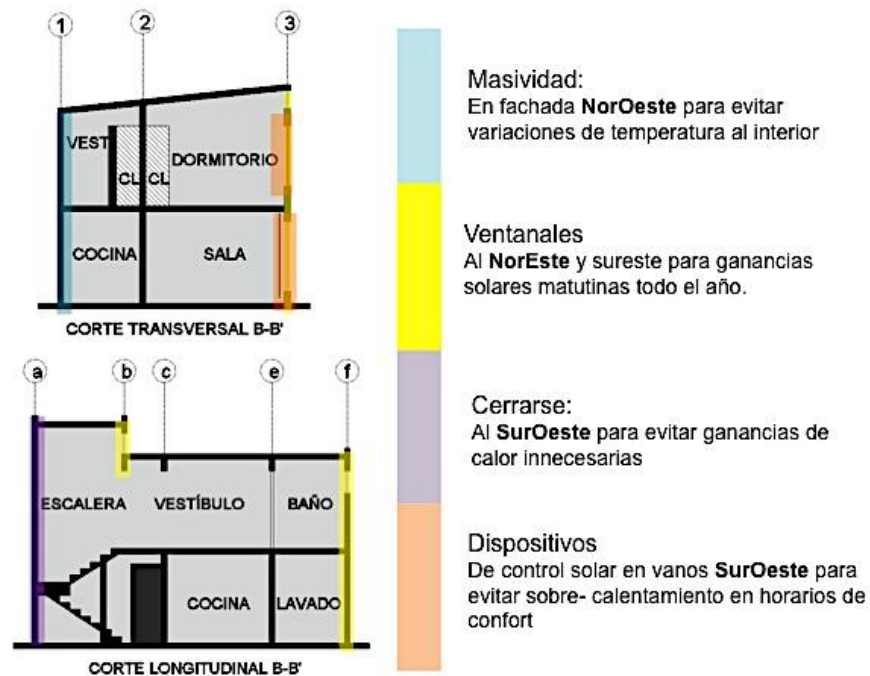


Figura 9 Cortes longitudinal y transversal del modelo A.

En la Figura 10 y la Figura 11 se muestran las fotografías del modelo A construido en acrílico en diferentes orientaciones con la finalidad de utilizar las propiedades ópticas del material para facilitar la visualización.

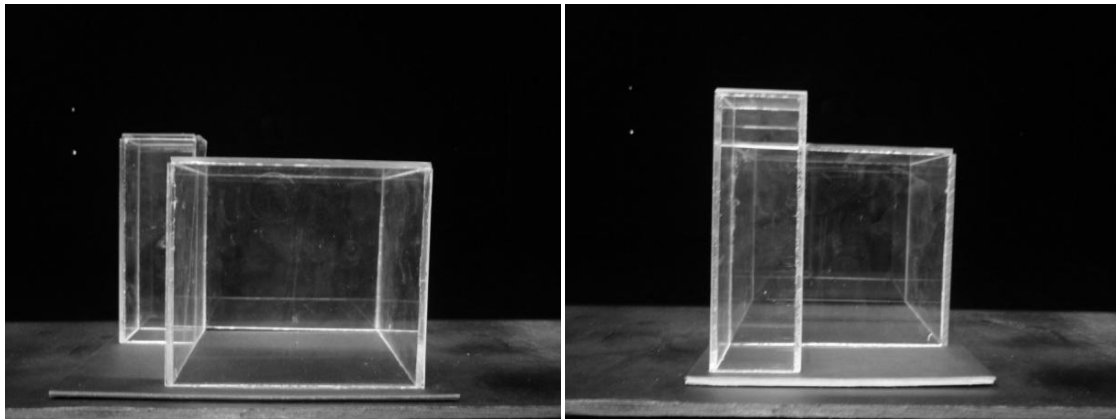


Figura 10 Modelo físico a escala construido en acrílico (a) vista frontal y (b) vista posterior

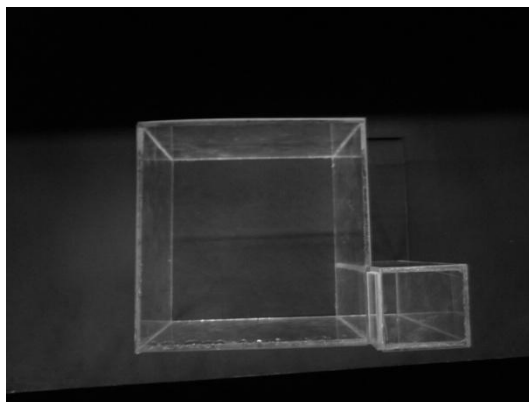


Figura 11 Vista en planta del modelo físico construido en acrílico

Una vista superior del modelo A construido en acrílico se presenta en la Figura 11, la disposición del modelo con respecto a la dirección del viento es frontal, ya que la dirección del viento es de izquierda a derecha o de acuerdo con la orientación del modelo a escala de sol naciente a sol poniente.

1.5. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO B

El modelo A cuenta con un área construida de 60.0 m^2 , la altura entre pisos es de 2.5 metros, los espacios habitables son: sala, comedor, cocina, área de lavado, dos recamaras y dos baños. Entre las consideraciones bioclimáticas básicas se aplican la masividad, el control solar y los dispositivos de control solar. A continuación se presentan las imágenes con las consideraciones:

En la Figura 12 se muestra la distribución de espacios arquitectónicos en la planta baja del modelo B junto con las consideraciones realizadas al mismo. En este caso de estudio se considerará que el modelo no se encuentra con ninguna colindancia. Para efectos del análisis solamente se estudiará el comportamiento del aire alrededor de la vivienda. Asimismo se considerará que el viento tiene una magnitud de velocidad constante a lo largo del experimento.

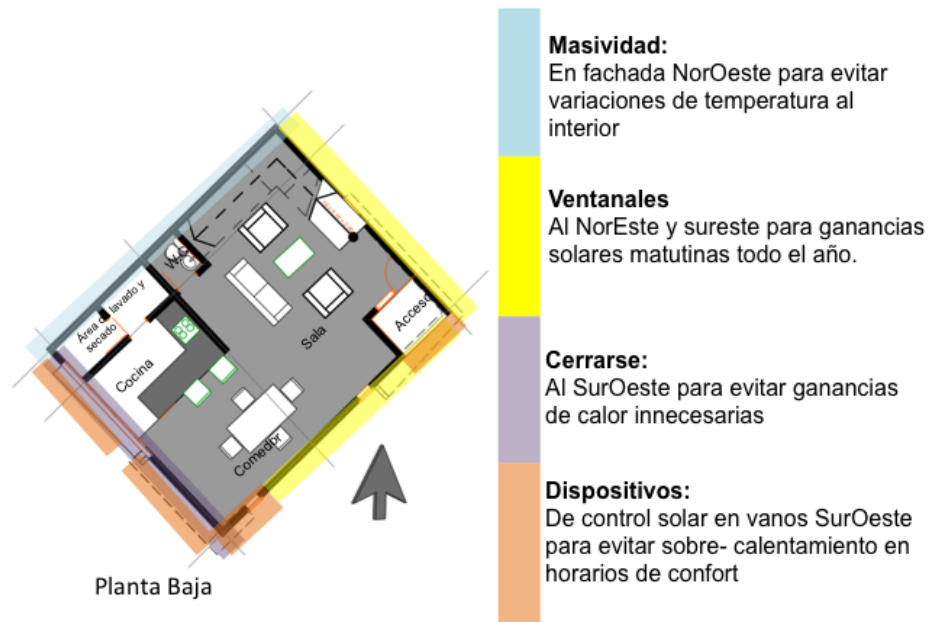


Figura 12 Consideraciones bioclimáticas en la planta baja del modelo B

En la Figura 13 se muestra la distribución de espacios arquitectónicos en la planta alta del modelo B junto con las consideraciones realizadas al mismo. En este caso de estudio se considerará que el modelo no se encuentra con ninguna colindancia. Para efectos del análisis solamente se estudiará el comportamiento del aire alrededor de la vivienda. Asimismo se considerará que el viento tiene una magnitud de velocidad constante a lo largo del experimento.



Figura 13 Consideraciones bioclimáticas en la planta alta del modelo B

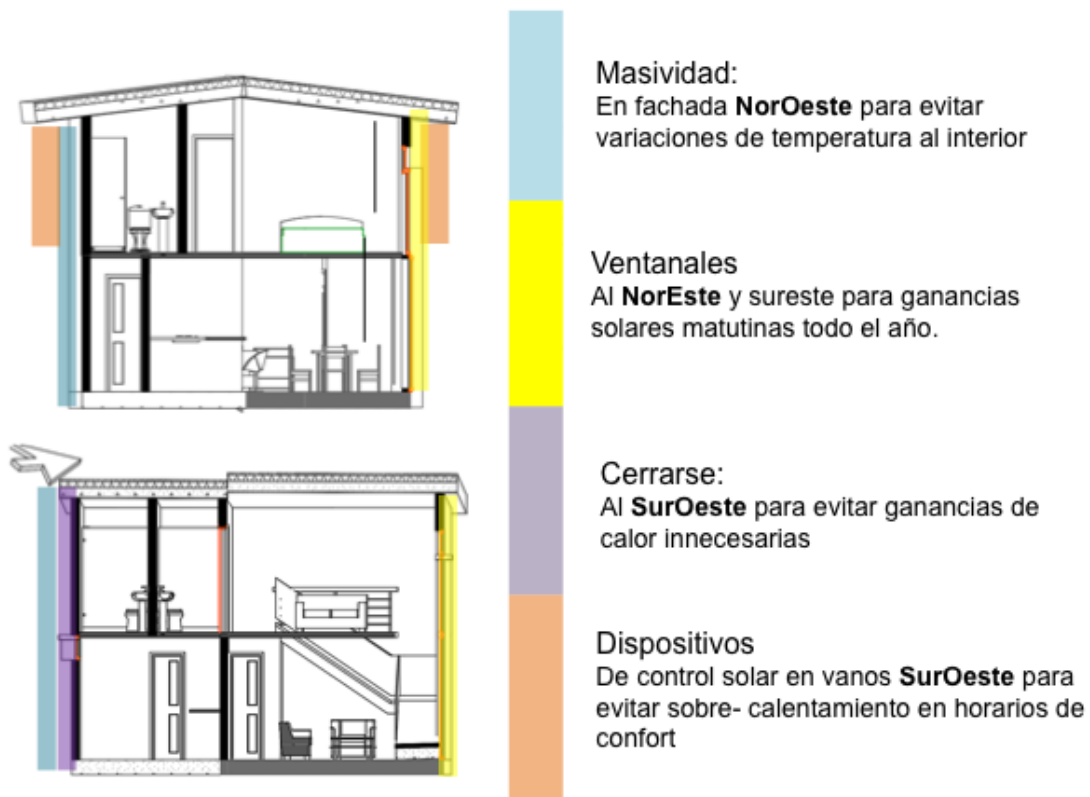


Figura 14 Corte longitudinal y transversal del modelo B

La Figura 14 muestra la representación que incluye los dos niveles y los dispositivos de control bioclimáticos. Este modelo se encuentra sobre una base construida también en madera.

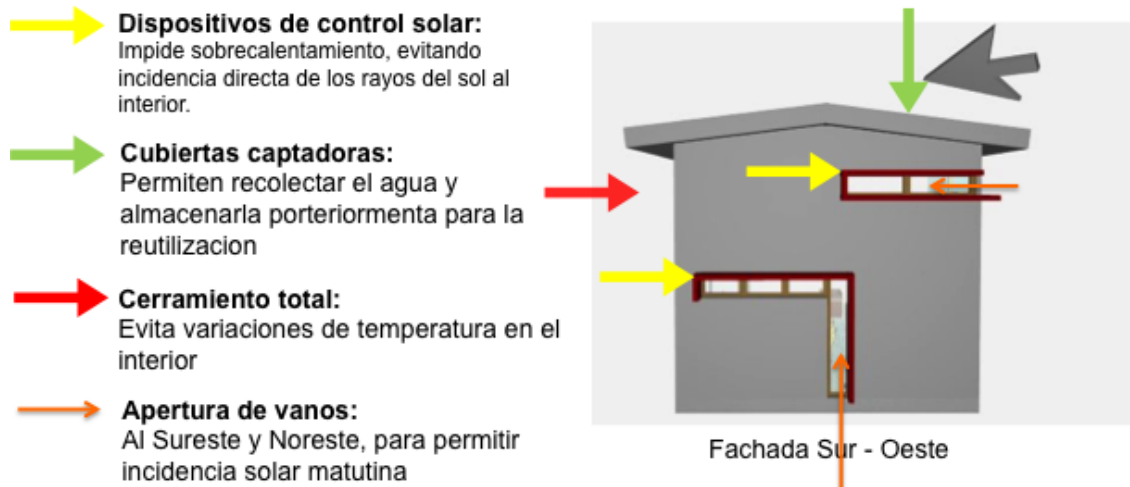


Figura 15 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-oeste del modelo B

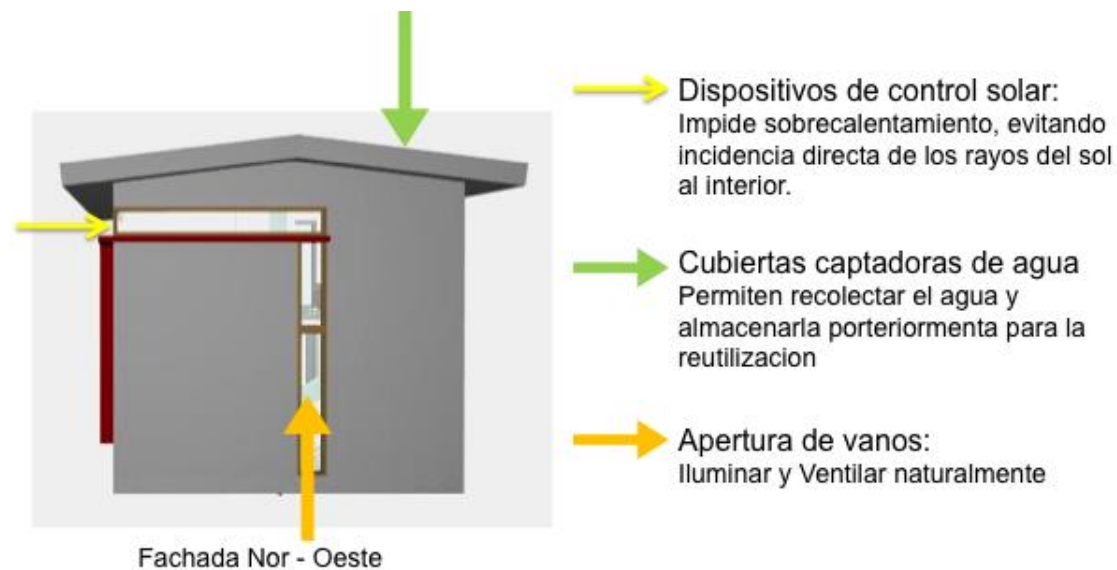


Figura 16 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-oeste del modelo B

La Figura 16 muestra la fachada sur-oeste con la finalidad de representar cada uno de las características de los dispositivos de control bioclimáticos la representación incluye los dos niveles de la vivienda.

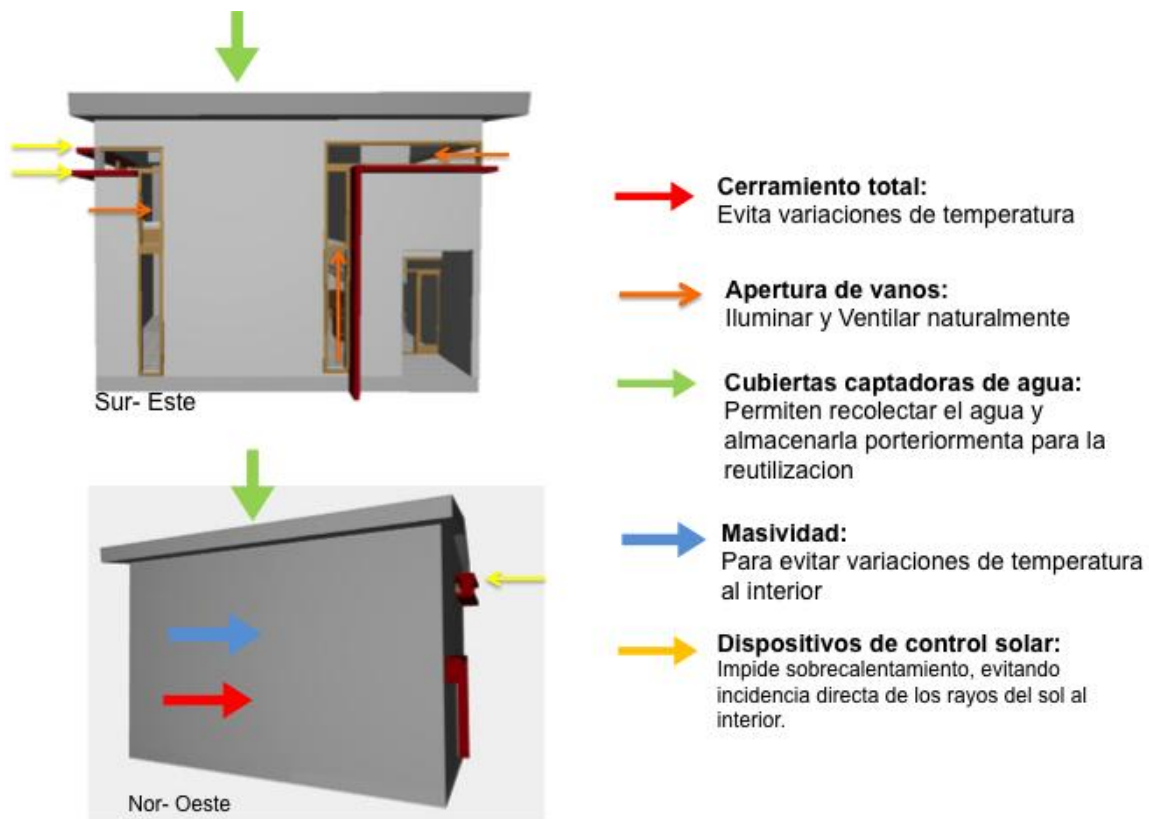


Figura 17 Consideraciones bioclimáticas en la fachada sur-este y noroeste del modelo B

En la Figura 17 muestra la fachada sur-este y noroeste con la finalidad de tener una representación en todas las fachadas de la vivienda destacando las características de los dispositivos de control bioclimáticos.

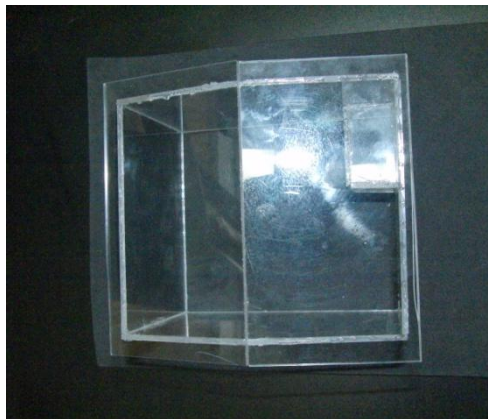


Figura 18 Fotografía del modelo a escala en vista superior del modelo B

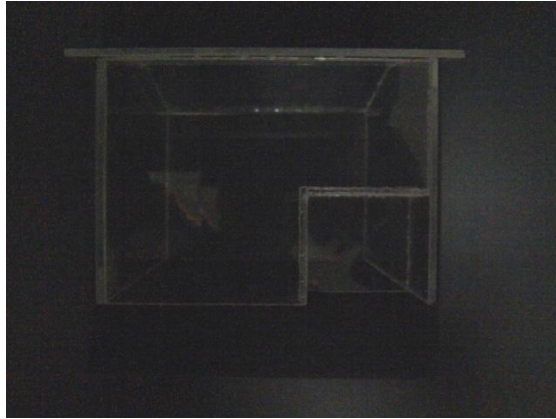


Figura 19 Fotografía del modelo a escala en vista frontal del modelo B

En la Figura 10 se muestran las fotografías del modelo B construido en acrílico en diferentes orientaciones con la finalidad de utilizar las propiedades ópticas del material para facilitar la visualización.

1.6. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento aerodinámico de dos casos de vivienda que cuentan con parámetros bioclimáticos mediante la implementación de una técnica experimental y una metodología de análisis de resultados para aprovechar la energía del viento en los alrededores de la envolvente.

1.7. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- I. Implementar una técnica de visualización en un túnel aerodinámico que permita el análisis de un conjunto de imágenes para obtener las líneas de corriente que describan el comportamiento del aire alrededor de una envolvente arquitectónica en un espacio tridimensional.
- II. Proponer una metodología de análisis aerodinámico para las viviendas que se diseñan con parámetros bioclimáticos.
- III. Implementar un sistema de iluminación al interior del túnel aerodinámico que permita visualizar la trayectoria de las corrientes de aire en el volumen de control.

- IV. Desarrollar un sistema de análisis de imágenes que considere la captura de la información y determine el comportamiento cualitativo del flujo mediante líneas de corriente en los alrededores de una geometría tridimensional
- V. Implementar un sistema de dispersión de partículas de humo en el área de pruebas del túnel aerodinámico.
- VI. Implementar un sistema de referencia para el análisis del flujo del aire en envolventes arquitectónicas.

1.8. HIPÓTESIS

El aire es un elemento indispensable para las actividades humanas, está presente en todos los lugares aún cuando es imperceptible para el sentido de la vista. El ser humano requiere ver el aire para interpretar como interactúa con los diferentes espacios y realizar hipótesis acerca de cómo aprovechar la energía del fluido. En la observación del aire es necesario plantear técnicas de visualización para proponer diferentes estudios aerodinámicos.

Los estudios aerodinámicos se pueden dividir en dos grupos, el estudio cualitativo permite conocer y visualizar el comportamiento del aire para describir las diferentes condiciones de operación a las que una envolvente arquitectónica está sometida. En el estudio cuantitativo es necesario determinar el tipo de variables que se van a medir, para determinar el tipo de instrumento y la precisión de los mismos.

En este trabajo se presenta una metodología de estudio basada en la iluminación de diferentes planos de un prototipo de vivienda a escala para estudiar el comportamiento del viento en sus alrededores y tener una idea clara de cómo es el flujo de aire en el interior de la zona de pruebas de un túnel aerodinámico.

Es posible encontrar las relaciones que existen entre las características del flujo y las relaciones geométricas de una envolvente arquitectónica para aprovechar la energía cinética del aire como una estrategia de diseño.

1.9. APOORTE AL DISEÑO

- I. En el análisis de la incidencia del flujo del aire sobre las viviendas, se propone que las envolventes geométrico – arquitectónicas, aprovechen la energía cinética del aire como estrategia de diseño bioclimático.
- II. Mediante el estudio de la incidencia del flujo de aire con la técnica de visualización experimental sobre la bloques de las viviendas, se plantea un diagnostico sobre las condiciones de la envolvente y su entorno, con base en este diagnostico es posible diseñar bloques de viviendas en las que todas las unidades en bloque, multipliquen las condiciones de confort con la finalidad de reducir la utilización de sistemas de climatización artificiales.
- III. Desarrollar una metodología de análisis del flujo del aire sobre edificaciones, dentro del túnel aerodinámico de baja velocidad, basados en el análisis de un grupo de planos bidimensionales.
- IV. Proponer un manual de las condiciones de operación de la técnica de visualización experimental dentro del túnel de viento de baja velocidad de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Los conceptos descritos a lo largo de este capítulo nos muestran las características de las clasificaciones y particularidades que encontramos en este estudios para llevar a cabo un análisis del comportamiento del mismo utilizando las herramientas matemáticas y de mecánica de fluidos aplicadas a la arquitectura de una manera accesible y práctica para los especialistas de las divisiones de Ciencias y Artes para el Diseño así como de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

2.2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

i. SISTEMAS DE REFERENCIA

En la descripción de un campo de flujo es conveniente pensar en partículas individuales, cada una de las cuales se considera como una pequeña masa del fluido, compuesta de un gran número de moléculas que ocupan un volumen pequeño y que se mueven junto con el flujo [9].

Descripción de Lagrange

En el estudio de la mecánica de partículas, se presta atención a partículas individuales, por lo que el movimiento es considerado en función del tiempo. La posición, velocidad y aceleración de cada partícula son identificables y por tanto calculadas. La descripción para el movimiento individual de las partículas de un fluido se le conoce como descripción Lagrangiana, así muchas partículas pueden ser identificadas y seguidas a lo largo de su recorrido. No obstante, se vuelve una tarea bastante compleja conforme el número de partículas aumenta, como es el caso de un flujo de fluidos [9].

Descripción de Euler

Una forma de identificar el movimiento de las partículas del fluido es identificar puntos en el espacio para después observar la velocidad de las partículas que

pasan por cada uno de ellos. En esta descripción las propiedades del flujo -como de la velocidad- son funciones tanto del espacio como del tiempo. También se puede calcular la presión y la densidad, que son consideradas de igual manera, como un punto en el espacio y el tiempo.

En los problemas de flujo de fluidos, lo esencial es la velocidad relativa con que se mueve el fluido con respecto al cuerpo o el volumen de control que lo contiene [9].

Por lo tanto, existen dos sistemas de referencia: en el primero, el observador (o la cámara) está inmóvil con respecto al cuerpo sólido; si el observador inmóvil con respecto a un pilar de puente ve un flujo estacionario que pasa, o está en un barco que se mueve a una velocidad constante en agua en reposo.

Para el observador las líneas de corriente no parecen cambiar, por lo que el flujo es estacionario. En cambio, en el segundo sistema de referencia, si el observador flota con la corriente y pasa el pilar o ve un barco pasar mientras está de pie en la orilla, la configuración del flujo que observa cambia con el tiempo, por lo tanto, el flujo deja de ser estacionario.

ii. VISCOSIDAD DE UN FLUIDO

La viscosidad de un fluido, es una medida de resistencia a la deformación cortante o angular. Las fuerzas de fricción en un fluido en movimiento o flujo, son el resultado de la cohesión y del intercambio de la cantidad de movimiento entre partículas [10].

Por tanto, cuando una partícula de fluido entra en una capa de menor velocidad tiende a incrementar su energía cinética. De manera semejante, cuando una partícula lenta de fluido entra en una capa con mayor velocidad tiende a frenarla.

En los gases, la viscosidad aumenta con la temperatura debido a un aumento correspondiente en la actividad molecular. Se ha establecido que la viscosidad de los gases aumenta con la temperatura y viceversa.

Las diferencias en la variación de viscosidad con la temperatura en el aire se pueden analizar de manera cuantitativa si se observan los mecanismos básicos que dan origen a la viscosidad.

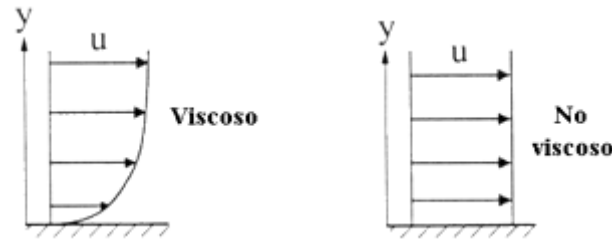


Figura 20 Diferencia del comportamiento entre fluidos viscosos y no viscosos en una pared [9].

iii. DEFINICIÓN DE FLUIDO

En diferentes textos se ha intentado dar una definición que permita considerar las diferentes características de que determinan a un fluido, sin embargo aún no se ha logrado conseguir una definición unificada del mismo, es por ello que lo más cercano a una definición de fluido sería de la siguiente manera. Aquel que no soporta esfuerzos de corte.

Sin considerar el estado de agregación de la materia, un fluido puede estar sometido a diferentes esfuerzos, los cuales pueden ser normales, aquellos que se definen como tensión y compresión de acuerdo a la dirección del vector que rige la fuerza sobre el área transversal en la que es sometido el esfuerzo. El esfuerzo de corte podría entonces quedar definido como el esfuerzo perpendicular al esfuerzo normal o también el esfuerzo que es paralelo al área transversal en donde se aplica la fuerza.

Un ejemplo puede ser cuando una corriente de agua pasa a través de una roca, el agua tendrá una trayectoria de colisión hacia la piedra y una vez que haga contacto, el agua como fluido de trabajo comenzará a desviarse para rodear a la envolvente geométrica. Al considerar la interacción del fluido con la superficie y con la superficie de la roca, se podrán observar que la dirección inicial del agua comienza a tener modificaciones irregulares tanto en tiempo como espacio.

Es debido a esta interacción que cuando inicialmente suponíamos una dirección uniforme de la corriente del agua podíamos suponer un comportamiento en forma de ordenada o un comportamiento laminar del flujo.

iv. DEFINICIÓN DE FLUJO

Los flujos viscosos se pueden clasificar en laminares y turbulentos, teniendo en cuenta la estructura del flujo. En un régimen laminar, la estructura del flujo se caracteriza por el movimiento de láminas o capas. La estructura del flujo con régimen turbulento se caracteriza por los movimientos tridimensionales, aleatorios, de las partículas del fluido, superpuestos al movimiento promedio. Casi todos los flujos que encontramos en la vida diaria son turbulentos.

Todos los flujos turbulentos son irregulares, aleatorios y caóticos y se encuentran formados por innumerables torbellinos de muy diferente escala donde los torbellinos más grandes son del orden del tamaño característico de la geometría del flujo mientras que los más pequeños son de un orden mucho menor que los primeros. Cuanto mayor es el número de Reynolds del flujo, menor es el tamaño de las estructuras más pequeñas [11].

Flujo laminar

Como se mencionó anteriormente, las características de una corriente de flujo pueden tener muchas variables, sin embargo una simplificación del caso es cuando debido a la relación que existe entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales del fluido podemos comenzar a definir el comportamiento de flujo laminar.

Un flujo laminar sería aquel que puede ser representado mediante un movimiento bidimensional de un grupo de partículas que pasan a través de un volumen de control tridimensional, es decir, cuando las simplificaciones de nuestro estudio del flujo no afectan significativamente los resultados y la trayectoria del flujo es

paralela a las paredes que contienen a un fluido en movimiento podemos mencionar un comportamiento de capas o láminas de fluido, las cuales pueden ser vistas de acuerdo con la viscosidad del fluido.

Flujo transitorio

Un flujo transitorio es aquel que se encuentra en un intervalo donde contiene propiedades de flujo laminar y turbulento. Sin embargo esta interacción se encuentra delimitada por la distancia entre las paredes que contienen al fluido y que se encuentra en movimiento. Las regiones cercanas a las paredes tenderán a ser altamente turbulentas mientras que en el núcleo o seno del fluido será un comportamiento laminar. Si bien es cierto, esta definición puede parecer poco probable para los fluidos que comúnmente estudiamos, la realidad es que existen aplicaciones importantes en donde el flujo transitorio se presenta. Un ejemplo muy útil en las actividades humanas es la capilaridad, donde las fuerzas inerciales y viscosas tienen un papel importante para generar caídas de presión y conseguir mediciones precisas o permitir que un insecto pueda estar sobre la superficie de un cuerpo de agua.

Flujo turbulento

En el caso de un fluido turbulento las laminas que definimos para representar el flujo laminar comienzan a superponerse entre sí. Debido a esta interacción podemos encontrar que existe una componente geométrica debido a las paredes que contienen a este fluido en movimiento, así como a la rugosidad de las paredes mismas. Esta interacción puede promover la interacción entre las laminas o líneas de flujo paralelas del fluido.

Otra componente que afecta notablemente sobre la superposición de las laminas de flujo laminar es debido a que las fuerzas inerciales son mucho mayores que las fuerzas viscosas. En este caso podemos observar que la simplificación realizada en el flujo laminar es una condición idealizada del flujo y que en realidad siempre existe una interacción de las laminas o líneas del flujo.

La naturaleza del flujo de fluidos es por lo tanto una condición natural, sin embargo es solo válida para aquellos fluidos que más nos interesa estudiar como son el agua y el aire, fluidos donde la viscosidad es del orden de $1 \cdot cP$ o centiPoise.

Principales características de la turbulencia

La turbulencia tiene cuatro características principales. La primera de ellas es la *irregularidad*. Ésta es la característica con mayor grado de apreciación para cualquier observador al manifestarse en la aparición de fluctuaciones de las variables de los fluidos (velocidad, presión, temperatura y concentración) de acuerdo a los tamaños y tiempos a diferentes escalas. También genera fluctuaciones no estacionarias en los flujos inicialmente estacionarios. Al presentarse este fenómeno los flujos turbulentos parecen caóticos e impredecibles, lo que algunos estudios justifican el uso de métodos estadísticos para su estudio.

La segunda característica es la *tridimensionalidad*. Existen flujos turbulentos que, al ser promediados en el tiempo, resultan tener un comportamiento que puede ser descrito mediante un espacio bidimensional. Sin embargo, a medida que descende la escala de los vórtices dentro del espacio que caracteriza a la turbulencia, se encuentra que el movimiento asociado es siempre tridimensional.

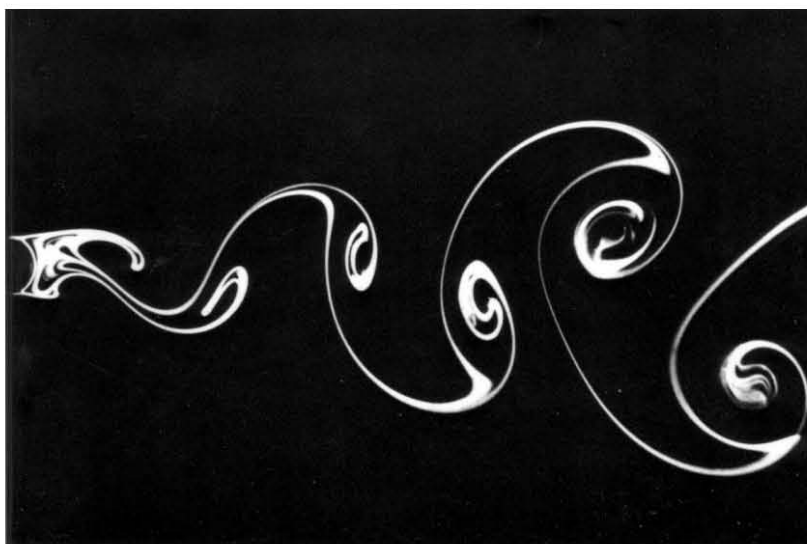


Figura 21 Formación de caminos de vórtices de Von Kármán [12]

La tercera característica es la *difusividad*. En la cantidad de movimiento y energía se ven notablemente amplificados por efecto de la turbulencia. Esto se debe a las fluctuaciones del movimiento turbulento. Si bien tienen lugar a escalas mucho mayores que la escala molecular, producen efectos difusivos semejantes a los de carácter molecular (al menos cualitativamente).

La cuarta característica es la *disipación*. Los flujos turbulentos son siempre disipativos. Una vez que se ha desarrollado el flujo turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse, aunque para ello necesite de un aporte continuo de energía. [11]

Número de Reynolds

El número de Reynolds es un numero adimensional con el que se puede explicar el movimiento de un flujo o caracterizar el fluido en relación a la escala de movimiento de este.

Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Cuando un numero de Reynolds es alto se dice que el flujo es turbulento y cuando el número de Reynolds es bajo el flujo es laminar.

El número de Reynolds es un escalar y además es regularmente una medición puntual por lo que es necesario tener una gran cantidad de puntos de medición, sin embargo si se considera que al instalar un instrumento, este afecta el comportamiento del flujo, cuando se instalan un numero de instrumentos se induce un flujo turbulento, excepto en aquellas técnicas no intrusivas de medición.

Para abordar el tema del estudio de flujos externos alrededor de un sistema es indispensable conocer los números adimensionales que describen el régimen del fluido -en este caso el llamado número de Reynolds-, que tiene las siguientes variables:

1. Densidad del fluido.
2. Velocidad de la corriente incidente.
3. Longitud característica del espécimen de ensayo.
4. Viscosidad del fluido.

Los flujos que registran un número de Reynolds bajo son llamados flujos deslizantes o también puede definirse como flujo de Stokes; estos en la práctica no son muy comunes. Los flujos sumergidos incompresibles son aquellos aplicados a una variedad de objetos, incluidos en las construcciones y edificaciones; se dividen en dos categorías:

1. Flujo alrededor de cuerpos con aristas.
2. Flujo alrededor de cuerpos aerodinámicos.

En la Figura 22 se observa un flujo de aceite con una viscosidad cercana a 20000 cP para obtener por medio del calentamiento uniforme del aceite líneas de flujo en color blanco, en este experimento físico se calculó que el número de Reynolds local alrededor del cilindro es 1. Esto significa que existe un equilibrio entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales, sin embargo en esta región se separa el flujo en dos, el flujo que está entre la zona donde el $Re=1$ y la pared del cuerpo se denomina capa límite.

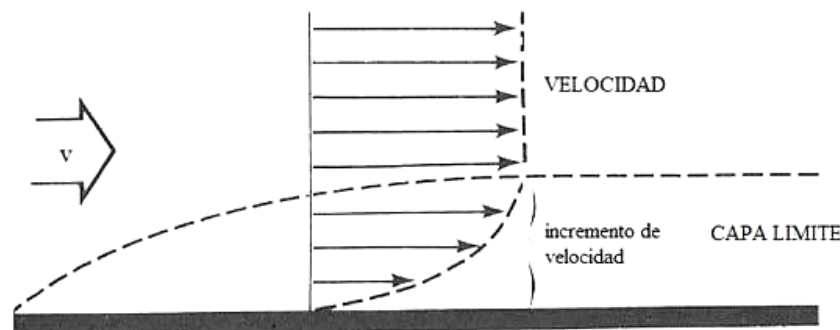


Figura 22 Espesor de la capa límite [13].

Los objetos largos, tales como cilindros, presentan un fenómeno interesante cuando se colocan normales al flujo; el objeto forma vórtices o remolinos (regiones de fluido circulante), regular y alternadamente separados desde lados opuestos, como se muestra en la Figura 23. Una vez que el flujo ha pasado por la perturbación y bajo ciertas condiciones de velocidad y viscosidad del fluido es posible observar el comportamiento característico nombrado en honor a Theodor

von Kármán (1881-1963). Los vórtices son emitidos en un intervalo de número de Reynolds $40 < Re < 10\,000$ y se denominan caminos de von Kármán.



Figura 23 Caminos de vórtices de von Kármán [14].

Cuando el arrastre viscoso es pequeño y el arrastre total está dominado por las pérdidas de presión, el cuerpo se describe como cuerpo romo. Un vórtice es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas. Como vórtice puede definirse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad.

La vorticidad es un concepto matemático usado en dinámica de fluidos que se relaciona con la cantidad de circulación o rotación de un fluido. La vorticidad se define como la circulación por unidad de área en un punto del flujo e implica la rotación de un elemento de flujo, lo que representa un conjunto de partículas del fluido que se mueve a través de un campo de flujo y puede ser visualizado de manera física o virtual. Un flujo secundario es un patrón de flujo superpuesto sobre la trayectoria del flujo principal [15].

2.3. DINAMICA DE FLUIDOS

v. CONCEPTOS

Estática de un fluido

La estática de fluidos estudia el comportamiento de un fluido, cuando este no presenta movimientos relativos entre sus partículas, y por lo tanto no se presentan tensiones tangenciales y el campo de tensiones es normal.

La ecuación fundamental de la estática de un fluido es una ecuación diferencial y se representa a continuación.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho \cdot g \quad (E1)$$

La anterior ecuación es válida para atmosferas en reposo; cabe señalar que esto casi nunca sucede; ya que la atmosfera esta en continuo movimiento. Esta ecuación indica como varia la presión en una cierta altitud.

Densidad

La Densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen y se representa con la letra griega (ρ) y la ecuación es la siguiente:

$$\rho = \frac{m}{v} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (E2)$$

Para plantear una definición de la densidad relativa de un fluido es fundamental basarse en la densidad del agua, lo que nos indica que la densidad relativa de un fluido es: *“la relación que se presenta entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, generando una magnitud adimensional”* y se observa en la siguiente ecuación:

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{abs}}{\rho_{agua}} \quad (E3)$$

Presión total, dinámica y estática

Para abordar el tema del comportamiento de un fluido o el desplazamiento de los fluidos , en este caso el aire, se sabe que se desplaza de una región de presión total alta a una región de presión total más baja ; debido a la ausencia de acción de trabajo. Hay que destacar que para que se presente un movimiento del flujo del aire en equipos como ventiladores dentro de un túnel de viento están implícitas la presión estática (P_a), dinámica (P_d) y total (P_t).

La presión se define como la fuerza por unidad de superficie, y se mide en Pascales o también en Newton por metro cuadrado(N/m^2), en el sistema internacional.

Propiedades de la presión de un medio fluido

- I. La presión en un punto del fluido en reposo es igual en todas las direcciones (Principio de Pascal)
- II. La presión en todos puntos situados en un mismo plano horizontal en el seno de un fluido en reposo es la misma.
- III. En un fluido en reposo la fuerza de contacto que ejerce en el interior del fluido una parte de este sobre la otra es normal a la superficie de contacto.
- IV. La fuerza de contacto no consiste en la presión de un fluido en reposo, se dirige siempre hacia el interior del fluido, es decir, es una compresión, no puede ser una tracción.
- V. La superficie libre de un líquido en reposo es siempre horizontal. Lo anterior es verídico solo en la superficie terrestre, debido a la acción de gravedad. Si no se presentan acciones gravitatorias, la superficie de un fluido es esférica.
- VI. Un punto determinado de una masa líquida está sometido a una presión, en función únicamente a la profundidad a la que se encuentra el otro punto. Otro punto a la misma profundidad tendrá la misma presión. A la línea imaginaria que pasa por ambos puntos se denomina superficie equipotencial de presión.

Presión Estática (P_e)

Existe cuando un fluido esta en movimiento y también cuando está en reposo; ya que todo fluido ejerce una presión sobre las paredes del objeto que lo contiene, manifestándose por igual en todas las direcciones, si esta se expresa como presión manométrica, puede ser positiva o negativa. Si se manifiesta positivamente, se dice que es mayor que la presión atmosférica por lo que se puede señalar que existe sobrepresión. Caso contrario si la presión es estática debe ser medida perpendicularmente al flujo del aire utilizando un instrumento llamado manómetro de columna de agua.

Para medir la presión estática se estima que no hay variación de la presión normal a las líneas de corriente rectas por consiguiente es posible medir la presión estática en un desplazamiento de un fluido, utilizando una toma de presión en la pared donde las líneas de corriente son rectas.

Presión Dinámica (P_d)

La presión dinámica solo se puede ejercer en la dirección del flujo y siempre es positiva y corresponde a la velocidad con la que fluye el aire. Es la medida de la energía cinética del mismo y la que rige el movimiento de un fluido. Se define por la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (E\ 4)$$

Donde q = Presión Dinámica, ρ = Densidad del Aire y V = Velocidad

Se puede determinar como la presión que genera el viento en un determinado lugar y bajo cierta energía cinética, es decir, la energía generada por el movimiento del viento al colisionar contra las paredes [9].

Presión Total (P_t)

La presión total se genera por el grado de compresión del aire y a su movimiento, se alcanza cuando el aire que fluye se desacelera, hasta una velocidad cero

mediante un proceso de fricción. Si el aire se encuentra en reposo, la presión total será igual a la presión estática [9]

$$P_T = P_E + P_D \quad (\text{E } 5)$$

Donde P_t = Presión Total, P_e = Presión Estática y P_d = Presión Dinámica.

Relaciones termodinámicas

Como se menciona anteriormente la densidad (ρ) es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y se puede utilizar en términos absolutos y relativos.

Densidad Absoluta

La densidad absoluta denominada también como densidad real, expresa la masa por unidad de volumen. La densidad es una propiedad extensiva de la materia producto de la masa y el volumen estas son propiedades intensivas. La densidad es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a el volumen [9].

Densidad relativa

La densidad relativa o aparente se denota la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, resultando una magnitud adimensional. La densidad del agua tiene un valor de 1Kg/l en condiciones de 1 atm y 4°C, equivalente a 100 Kg/m³. [9]

Densidad media y puntual

Para un material homogéneo, la fórmula masa/volumen, se puede aplicar sin temor a fallas, a diferencia de un objeto no homogéneo, la anterior fórmula presenta un problema ;debido a que la densidad en las distintas partes es diferente, si este fuese el caso no se puede medir la densidad media, aplicando la fórmula masa volumen a todo el objeto, o la densidad puntual que será distinta en cada punto del objeto. En esta variante, la fórmula se aplica a cada porción del objeto que sea homogénea [9].

Mediciones de densidad

Al aplicar a formula masa/ volumen, la densidad se puede medir indirectamente. La masa se mide generalmente con una balanza, y el volumen se mide directamente, si se conoce la forma del objeto y se miden las longitudes apropiadas, o indirectamente, un ejemplo de ello es mediante el desplazamiento de un liquido.

Uno de los instrumentos que se utiliza con frecuencia para medir en forma directa la densidad de un liquido es el densímetro. Un instrumento poco usual es el picnómetro de gas. Otra herramienta para medir las densidades tanto de líquidos como de gases es un instrumento digital basado en el principio del tubo oscilante [9].

Compresibilidad

Los fluidos donde la variación de la densidad es despreciable, se denominan incomprensible; aun cuando la variación de la densidad dentro del flujo no es despreciable el flujo se puede denominar comprensible y es cuando existe un cambio de fase en el fluido de trabajo debido a la diferencia de presión. Un ejemplo de ellos se puede observar en los gases no ideales.

Por otra parte el flujo de líquidos generalmente se le denomina como incomprensible debido a las distancias interatómicas de las moléculas del líquido que impiden que las moléculas se acerquen más y también debido a la fuerza de los enlaces que existen entre las moléculas.

La transferencia de calor entre gases también pueden considerarse incomprensible, siempre que la velocidad del flujo sea pequeña en relación con la velocidad del sonido.

Cuando el número de Mach, $M < 0.3$, la variación de la densidad máxima es menor al 5 %. De manera que los flujos de gas con $M < 0.3$ pueden tratarse como incomprensibles; un valor de $M = 0.3$ en el aire en condiciones estándar , le corresponde una velocidad aproximada a 100 m/s.

Los efectos de la compresibilidad son importantes en el diseño de aeronaves y misiles de alta velocidad, centrales eléctricas, ventiladores y compresores [9].

Líneas en el tiempo, líneas de trayectoria, líneas de traza y líneas de corriente.

Para realizar un análisis de los fluidos, resulta de gran importancia y a su vez ventajoso, obtener una representación visual del campo de flujo, esta representación se puede generar por medio de líneas de tiempo, trayectoria, de traza y corriente.

vi. ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Hipótesis del medio continuo

Diversos autores mencionan que en la definición de fluidos no se describe la estructura molecular de la materia; ya que todos los fluidos están compuestos de moléculas en constante movimiento, y es por ello que en los estudios de fluidos se concentran en los efectos macroscópicos o promedio de un grupo de moléculas.

Estos efectos macroscópicos, son los que generalmente se miden. De este modo se trata al fluido como una sustancia infinitamente divisible, es decir un medio continuo, dejando a un lado el comportamiento individual de las moléculas.

Como consecuencia de la superposición de la hipótesis del medio continuo, se considera que cada propiedad tiene un valor definido en cada punto del espacio. Por ello, las propiedades del fluido como la densidad, la temperatura, la velocidad etc, se consideran como funciones continuas de la posición y el tiempo [9].

Conservación de la masa

La conservación de la masa en el flujo de un fluido exige que la acumulación de masa dentro del volumen de control quede justificada por el flujo neto de la masa que atraviesa la superficie de control, pues no es posible crear ni destruir la masa dentro del volumen de control. La ecuación de la conservación de masa aplicada a

un volumen fijo de control, se puede definir a través de la sumatoria de la rapidez de acumulación de masa dentro del volumen de control más la rapidez neta de flujo de masa de aire que sale a través de la superficie de control, esto será equivalente a cero [10].

Ecuaciones de cantidad de movimiento

La segunda ley de Newton -a menudo llamada ecuación de cantidad de movimiento- plantea que la fuerza resultante que actúa en un sistema es igual a la velocidad de cambio de la cantidad de movimiento del sistema, cuando es medida en un marco de referencia inercial. Cuando se aplica la segunda ley de Newton -o de movimiento- la cantidad de la suma de la dirección de los vectores representa todas las fuerzas que actúan en el volumen de control. Las fuerzas incluyen las fuerzas parciales generadas por el ambiente al actuar en la superficie de control y las fuerzas de cuerpo originadas por campos magnéticos gravitacionales. A menudo se utiliza la ecuación de la cantidad de movimiento para determinar las fuerzas inducidas por el flujo [13].

Una aplicación común del principio de cantidad de movimiento consiste en encontrar las fuerzas ejercidas por un fluido en movimiento sobre un cuerpo sólido. Si se conocen la masa de una partícula y la fuerza que actúa sobre ella, con la segunda ley de Newton es posible determinar su aceleración [13].

El principio de la cantidad de movimiento, sólo abarca las fuerzas que actúan sobre la masa de fluido dentro de un volumen de control determinado; las fuerzas que actúan sobre una estructura son iguales y opuestas a las fuerzas de presión del contorno que actúan sobre el fluido. La fuerza de un fluido sobre una estructura suele distribuirse como una fuerza de presión que varía de un punto a otro de la superficie. Normalmente se investiga sobre la resultante de esta distribución, y sólo se consideran las presiones que difieren de la atmosférica [13].

Los fluidos también se categorizan como newtonianos y no newtonianos. Los fluidos newtonianos son aquellos en los que la constante de proporcionalidad (es decir, la viscosidad) no cambia con la velocidad de deformación. De igual manera,

no presentan variaciones en sus variables con respecto al tiempo, y son denominados como flujos estacionarios [13].

Ecuaciones de Bernoulli

En el estudio del movimiento de fluidos podemos considerar una partícula de fluido como un punto material sometido a interacciones con otras partículas. Si la partícula se encuentra en movimiento en el seno de un campo fluido y la masa de dicha partícula es la energía mecánica de la partícula, entonces estará compuesta de los siguientes términos:

1. Energía cinética.
2. Energía potencia.
3. Energía de presión.

La ecuación de Bernoulli establece que bajo determinadas premisas, la suma de los tres términos de la energía específica de la partícula de fluido se conserva constante. Las tres premisas necesarias son las siguientes:

El balance de la ecuación se establece a lo largo de una línea de corriente.

El flujo es estacionario e incompresible.

2.4. CRITERIOS DE SIMILITUD

Las mediciones dentro de un túnel de viento conllevan una serie de factores que consideré en mi investigación, muchos de los cuales se derivan de las condiciones físicas bajo las cuales deben realizarse los experimentos.

Los modelos a escala se emplean para ahorrar recursos, ya que es mucho más económico construir modelos a escala que fabricar el prototipo a escala real. Las leyes de escalamiento son necesarias para predecir los resultados a escala real, para ello, se utilizan las pruebas en modelos a escala. Para que un modelo sea útil debe proporcionar datos que se puedan extrapolar de manera sencilla mediante

un simple cambio de escala de las fuerzas, los momentos y las cargas dinámicas que existirán en un prototipo de escala completa [16].

Existen tres niveles de semejanza que se deben satisfacer antes de afirmar que un modelo es completamente semejante. Existirá la *semejanza dinámica* porque las fuerzas en modelo y prototipo guardan la misma proporción. La *semejanza geométrica* impondrá que todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tengan la misma relación en el modelo a escala. La *semejanza cinemática* impondrá que dos partículas homólogas habrán de pasar por puntos homólogos en instantes homólogos.

vii. SEMEJANZA GEOMÉTRICA

El modelo debe tener la misma forma que el prototipo, es decir, debe ser geoméricamente semejante con respecto al modelo de escala real. Esto requiere que las longitudes homólogas estén correlacionadas para una razón constante. La semejanza geométrica requiere que el modelo y el prototipo sean geoméricamente semejantes, es decir se parezcan. La semejanza geométrica requiere que el modelo y el prototipo tengan la misma forma, en relación que todas las dimensiones lineales del modelo se relacionen con las correspondientes dimensiones del prototipo mediante un factor de escala constante.

viii. SEMEJANZA CINEMÁTICA

Un campo de flujo es cinéticamente semejante si, en puntos homólogos del flujo de las velocidades, está en razón constante. Se dice que dos flujos son semejantes de forma cinemática cuando las velocidades en puntos correspondientes de cada uno de los flujos se encuentran en una misma dirección y están relacionadas en magnitud por un factor de escala constante. De este modo, los dos flujos que sean semejantes de forma cinemática también tienen sus patrones de líneas de corriente relacionados mediante un factor de escala constante. La semejanza cinemática requiere que los regímenes de flujo sean los mismos para el modelo y el prototipo.

ix. SEMEJANZA DINÁMICA

Para que dos flujos posean semejanza dinámica deberán poseer tanto semejanza cinemática como semejanza geométrica. Para lograr la semejanza dinámica completa deberán considerarse que todas las fuerzas sean importantes en cierta situación. Las fuerzas que actúan en masas correspondientes en el flujo de fluidos alrededor del modelo y en el flujo de fluidos alrededor del prototipo deben conservar la misma relación en todos los campos de flujo. Las fuerzas que actúan son las siguientes:

1. Fuerzas inerciales.
2. Fuerzas de presión.
3. Fuerzas viscosas.
4. Fuerzas de gravedad.

2.5. HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

A continuación se enlistan y describen las características relevantes en la presente investigación de los equipos y herramientas aplicadas y la relación que guarda con los conceptos mencionados a lo largo de este capítulo.

x. TUNEL AERODINAMICO

La herramienta del túnel aerodinámico juega un papel significativo en la historia de la humanidad ya que fue utilizado por primera vez en las investigaciones de los hermanos Wright, en 1901.

El deseo de alcanzar las alturas y volar llevó a los hermanos Wright a explorar la dinámica del aire con la finalidad de generar un instrumento que les ayudase a rediseñar las alas de los prototipos de sus aeroplanos. Diseñaron una serie de pruebas para determinar la presión y la dirección del viento que se generaba en las superficies curvas por los flujos de aire en diferentes ángulos. Incidiendo desde

0° hasta 90° llegaron a un nivel de precisión en sus medidas que, en tan sólo algunos meses, generan la base de datos más amplia de la que se tenía registro.

En 1905 patentaron una herramienta para simular el comportamiento del aire como se muestra en la Figura 24 y se convirtieron en los pioneros de la documentación aeronáutica, justamente basados en los resultados arrojados por el túnel de viento.

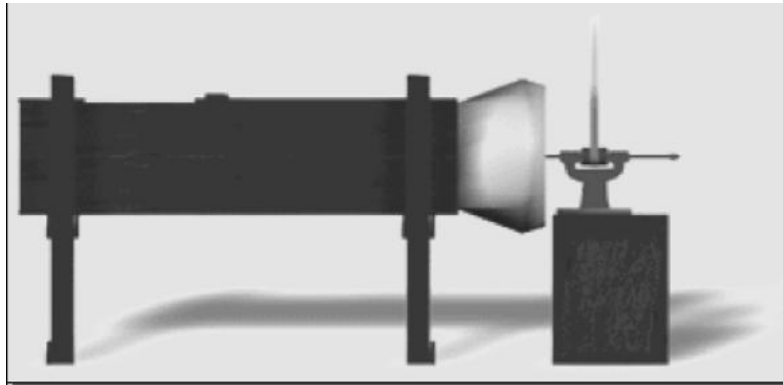


Figura 24 Túnel aerodinámico utilizado por los hermanos Wright [17]

Los túneles aerodinámicos -o túneles de viento- son un instrumento científico cuya aplicación, según Ruiz, Sanz, Perales y Pindado (2001, en Fernández Mesa, 2008): "...es la de generación de una corriente de aire de propiedades conocidas y controladas para la medida de la acción del viento sobre elementos de diferente índole...". Esta acción controlada del aire permite realizar investigaciones en las que se reproduzcan las condiciones reales en un modelo real, reproducidas sobre un modelo a escala [17].

La importancia de este instrumento radica en la posibilidad de estudiar el comportamiento del flujo del viento sobre modelos a escala con la complejidad real de un fluido, lo cual facilita la recopilación de datos con una precisión paralela al fenómeno que se presenta en la escala real [18].

Un túnel aerodinámico se compone de las siguientes partes:

1. Campana de contracción.
2. Sección de pruebas o cámara de ensayos.

3. Difusor.
4. Ventiladores o abanicos.
5. Descarga del flujo de Aire

Túnel de circuito abierto

El túnel de circuito abierto utiliza el aire externo para impulsarlo en la zona de pruebas, para luego descargarlo al exterior. La instalación e implementación es económicamente viable; no obstante, al utilizarlo una sola vez la carga del aire genera un consumo energético alto y puede no alcanzar el confort acústico. Aunado a ello, las condiciones termodinámicas del aire son variables que dependen de las instalaciones con las que cuente el laboratorio. En esta categoría de túneles se encuentran: primero, el túnel de presión de impacto, cuya sección de pruebas se ubica en el área de descarga del aire, ocasionando que el flujo genere un régimen turbulento; y el segundo, el túnel de succión, cuya sección de pruebas se encuentra sobre el ingreso del aire, ocasionando que las pruebas sean de flujo en régimen cuasi-laminar, sin embargo se pueden hacer modificaciones para cambiar a un régimen turbulento.

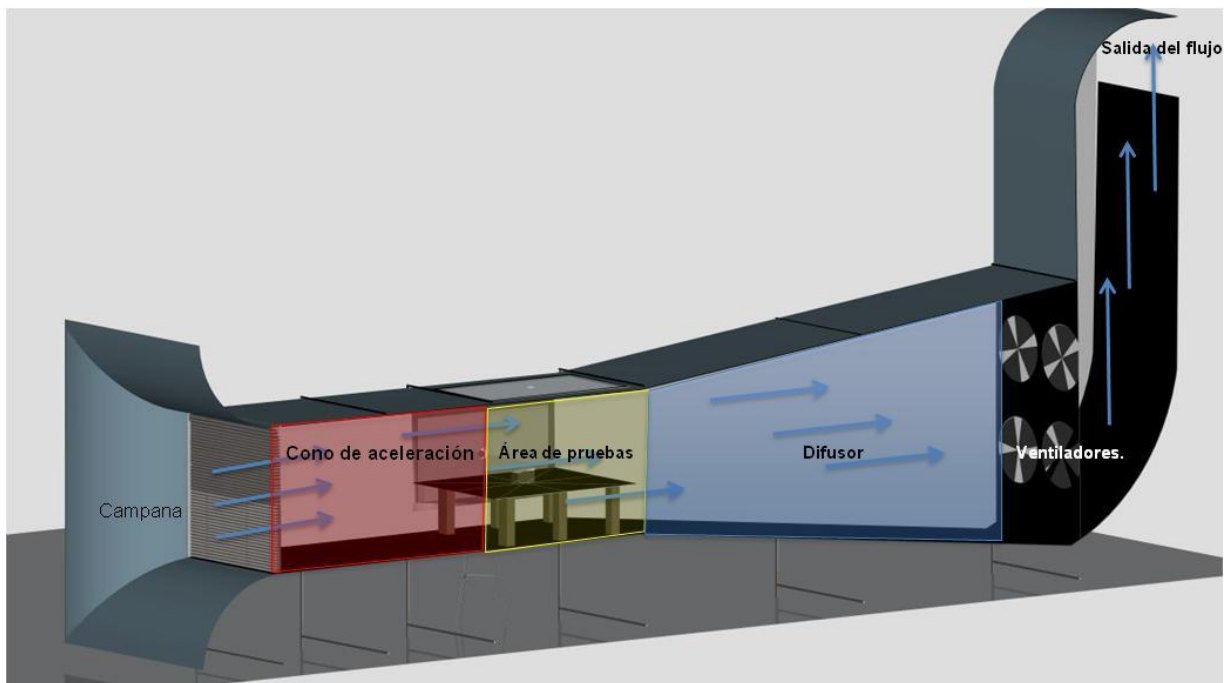


Figura 25 Diagrama esquemático de un túnel de circuito abierto

Los componentes del túnel de succión son:

1. Campana de contracción.
2. Sección de pruebas o cámara de ensayos.
3. Difusor.
4. Ventiladores o abanicos.
5. Descarga del flujo de aire.

Túnel de circuito cerrado

La composición física de este túnel es cerrada, como su nombre lo indica, permitiendo que el aire que se utiliza circule únicamente en el mismo circuito, así tiene menor consumo energético al restaurar las pérdidas de calor por fricción. Cuando el túnel es de circuito cerrado la descarga entra nuevamente a la zona de contracción. En este túnel se pueden controlar las propiedades termodinámicas del aire: la temperatura, la presión y la densidad; aunado a ello, cuenta con un sistema que genera variaciones en la humedad.



Figura 26 Fotografía aérea tomada de las instalaciones de Ferrari en Italia

En la Figura 26 se observa el exterior del túnel de circuito cerrado con el cual se pueden realizar pruebas con modelos a escala 1:1, en esta instalación se pueden hacer pruebas con diferentes temperaturas del aire.

xi. INSTRUMENTACIÓN

Manómetro inclinado

El manómetro es un instrumento utilizado para la medición de la presión en los fluidos. Determina la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local. La presión se mide en atmósferas (atm); en el sistema internacional de unidades (SI) la presión se expresa en N ewtones por metro cuadrado, lo que equivale a un Pascal (Pa). La atmósfera se define como 101,325 Pa o también 760 mm de mercurio en un barómetro convencional como se muestra en la Figura 27.



Figura 27 Manómetro inclinado[19]

El manómetro inclinado utiliza dos puertos con conexión a un tubo Pitot, con ellos se obtiene una diferencia de presiones y se puede expresar como la diferencia entre la presión total y la presión estática; de esta manera queda definida la presión dinámica. El tubo Pitot registra la presión total y la presión estática cuando éste se encuentra debidamente conectado al manómetro inclinado y en dirección paralela a la dirección del flujo.

Un tubo Pitot funciona según las bases de la dinámica de fluidos y es un ejemplo para la aplicación práctica de la ecuación de Bernoulli. El principio de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de

corriente y expresa que, en un fluido ideal en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

Transductores de presión

Los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en una magnitud eléctrica que es la que se emplea en equipos de adquisición automatizada de datos. Por lo tanto, los valores arrojados por los sensores de presión digitales es una diferencia en voltaje o amperaje. Es necesario realizar una conversión de unidades a fin de obtener los datos en Pascales o directamente en valores de velocidad [9].



Figura 28 Sensores de presión instalados en el túnel aerodinámico

xii. VISUALIZACIÓN

Existen diversas técnicas de visualización del flujo de aire dentro del área de pruebas de los túneles aerodinámicos. En general se utiliza la que mejor describa el comportamiento del movimiento del flujo de fluidos.

Durante siglos, los investigadores han estudiado el flujo de los fluidos, en la actualidad el estudio del comportamiento del flujo de fluidos es un campo de investigación relevante. Las áreas de estudio del flujo de fluidos son variadas. Los flujos en estado de agregación gaseoso se estudian para el desarrollo de coches,

aviones y naves espaciales; también para el diseño de máquinas tales como las turbinas y los motores de combustión. La investigación del flujo de la materia en estado líquido tiene aplicaciones en la ingeniería naval para el diseño de buques, de igual manera es ampliamente utilizado en la ingeniería civil en el diseño de puentes, grandes edificios y estructuras en general. En todos los tipos de investigación de flujo de fluidos la visualización es una cuestión clave. Las técnicas de visualización experimental del flujo de fluidos son utilizadas por varias razones:

1. Para tener una idea del flujo de fluidos en torno a un modelo a escala a partir de uno real, sin la necesidad de realizar ningún tipo de cálculos.
2. Desarrollo de nuevas y mejores teorías de la experimentación con flujos de fluidos.
3. Investigación de nuevas teorías aplicadas a modelos experimentales.
4. La técnica experimental es ampliamente utilizada, sin embargo, también existen algunos inconvenientes en la utilización de estas técnicas:
5. El flujo de fluidos a menudo se ve afectado por la técnica experimental y no todos sus fenómenos pueden ser visualizados con ella.
6. La construcción de modelos físicos a escala y la utilización de equipos experimentales, como los son los túneles de viento, son de costo elevado y el tiempo necesario para llevar a cabo los experimentos lo es también.

Trazadores

Los trazadores, son aditivos agregados al fluido que permiten observar los patrones de flujo. Un trazador efectivo no altera el patrón del flujo, si no que es transportado por el flujo y es fácil de observar. Es importante que los trazadores no se vean afectados por fuerzas gravitacionales centrífugas que produzcan diferencias de densidad. Además, su tamaño deberá ser por lo menos de un orden de magnitud más pequeño que la escala de longitud del campo de flujo real.

Burbujas de hidrógeno

Para obtener resultados confiables se utilizan burbujas de hidrogeno como trazadores puesto que son más pequeñas que las de oxígeno, y se forman en grupos que son visibles. Las burbujas son transportadas por el flujo.

Visualización de flujo con caolín

Es una mezcla de aceite y tinte que se puede aplicar a la superficie del modelo. Cuando el flujo de aire hace contacto con el modelo, el aceite y partículas de colorante se mueven lentamente en la dirección de la corriente local.

Partículas de helio

Las partículas de aire pueden ser introducidas como burbujas de helio. Con la selección apropiada de una mezcla de jabón y agua, se producen burbujas de jabón llenas de helio que no flotan; es posible producir diámetros de burbuja del orden de 4mm.

Para mejorar la visibilidad del flujo de aceite, un tinte ultravioleta puede ser usado de tal manera que cuando se ilumina con luz ultravioleta el tinte fluorescente muestre el patrón de flujo.

Visualización con humo

Este tipo de visualización es la que comúnmente se emplea en los túneles de viento. Consiste en una técnica de inyección donde el humo es creado vaporizando aceite con un hilo fino caliente. El humo también puede ser emitido por un tubo de diámetro pequeño para crear una o más líneas de flujo como se muestra en la Figura 29.



Figura 29 Experimento con un modelo a escala

Velocimetría de partículas (PIV)

La técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) está basada en el análisis de imágenes del flujo y permite determinar el campo de velocidades en un plano del fluido. Para ello, registra -en fotografía y video- las imágenes de las partículas trazadoras en dos instantes separados por un intervalo de tiempo preseleccionado. La medida de la distancia de separación entre las imágenes de cada partícula proporciona el desplazamiento recorrido por la partícula durante dicho intervalo de tiempo; la velocidad del flujo se obtiene como el cociente entre el desplazamiento medido y el intervalo de tiempo seleccionado.

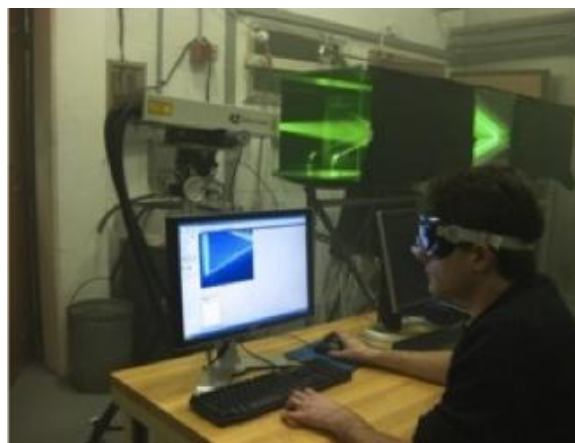


Figura 30 Laboratorio con un instrumento PIV en el NIST en E.U. [20]

Los aspectos más importantes de la técnica piv son los siguientes:

1. Partículas trazadoras.
2. Sistema de iluminación.
3. Sistema de registro.
4. Proceso de análisis de imágenes.
5. Post-procesado de las medidas.

Avances tecnológicos recientes en la medición simultánea de dominios de flujo de dos y tres dimensiones han conducido a la definición de un velocímetro de luz pulsante genérica. Que consiste en una fuente luminosa pulsante que ilumina las pequeñas partículas de fluido arrastradas durante cortos periodos de exposición y una cámara sincronizada con la luz para registrar la ubicación de las partículas.

Partículas trazadoras

Las partículas trazadoras insertadas en el flujo deben seguirlo adecuadamente para que su velocidad represente la del flujo. Además, su posición debe ser registrada fácilmente al ser iluminadas. Los requerimientos son:

1. Deben seguir adecuadamente el flujo.
2. Deben dispersar suficiente luz para poder ser registradas.
3. Tener una cantidad de partículas adecuada para obtener resultados de análisis confiables.

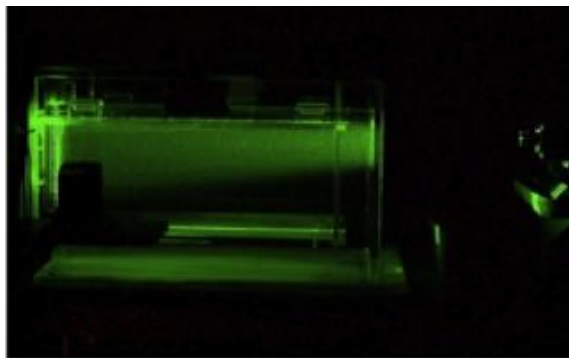


Figura 31 Partículas trazadoras [20]

El primer requerimiento está relacionado con la densidad del material que constituye la partícula y de su tamaño. En cambio, el segundo no sólo depende de la propia partícula sino que está relacionado también con la potencia del láser empleado y con la sensibilidad del sistema de registro. El último requerimiento es resultado de la experiencia y de diversas simulaciones realizadas para obtener éxito en la evaluación de imágenes PIV.

CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta las consideraciones que se tomaron antes de realizar las pruebas, el desarrollo del experimento así como la descripción de como se realizó la interpretación de los resultados.

El flujo del aire se presenta de forma tridimensional sobre cualquier superficie, lo que se dificulta la visualización y el análisis de la interacción del aire sobre las edificaciones. Para poder observar este movimiento se requiere de equipo altamente especializado, costoso y difícil de manipular. Es por ello que en la presente investigación se plantea una técnica de visualización del flujo del aire sobre envolventes arquitectónica en el túnel aerodinámico del laboratorio de Diseño Bioclimático de la UAM Azcapotzalco que reduzca y omita la utilización de dispositivos especializado pero obtener visualizaciones con excelentes resultados

El primer paso para el desarrollo de la investigación de la técnica experimental de visualización para envolventes arquitectónicas, es la construcción de tres modelos físicos tridimensionales de viviendas de interés popular, los cuales previamente se seleccionaron bajo un parámetro de análisis bioclimático.

Los volúmenes físicos tridimensionales de los prototipos de las viviendas, se elaboraran en un material translucido, rígido y resistente como se muestra en la Figura 32.

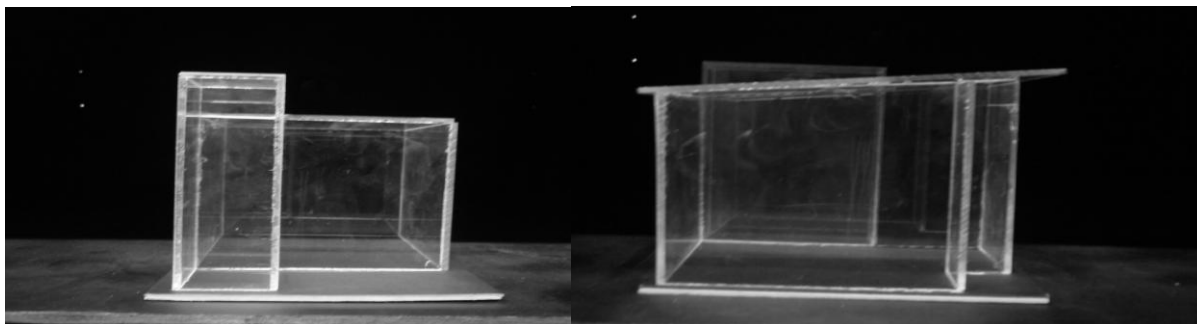


Figura 32 Casos de estudio contruidos en acrílico

La escala que en la que se construyeron los volúmenes físicos tridimensionales es 1:50, se determinó que los acabados en los modelos fueran los necesarios para

lograr una semejanza geométrica entre los prototipos a prueba y la envolvente arquitectónica de la vivienda construida en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Otra variable importante que influyo en la determinación de la escala utilizada es el área de pruebas del túnel de viento.



Figura 33 Zona de pruebas del túnel aerodinámico

3.2. ESTRUCTURA DE LA BASE DE LA TÉCNICA DE VISUALIZACIÓN

En el diseño de la estructura del soporte de la técnica experimental de visualización fue de suma importancia la caracterización del túnel de viento de la UAM –A, desarrollado por Fernández Meza en el año de 2008. Apoyados en esta caracterización del flujo del aire, se planteó la estructura de soporte de la técnica de visualización, al interior del área de pruebas del túnel aerodinámico.

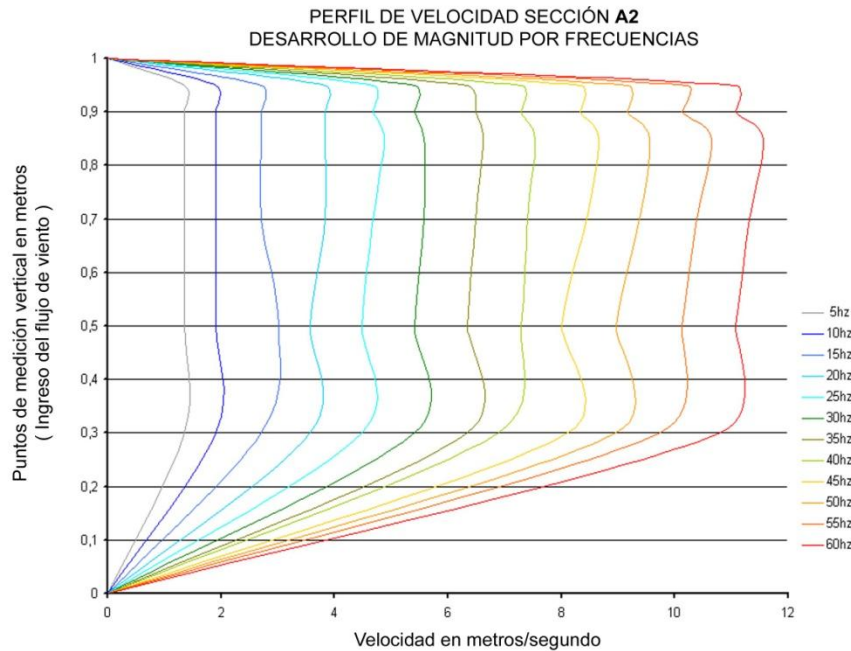


Figura 34 Perfiles de velocidad en el túnel aerodinámico de la UAM A [17]

Para establecer la orientación de la estructura nos basamos en el análisis de los perfiles de velocidad, así como la uniformidad de los desplazamientos de aire con diversas frecuencias y demás características que esta herramienta desarrolla. La Figura 34, muestra información sobre la uniformidad del flujo en diferentes alturas como lo son:

Desde el punto (0) hasta el punto (0.3 – 30cm) el flujo del aire no es uniforme.

- i. (0.10 – 10cm) hasta el punto (0.2 – 20cm) el flujo del aire no es uniforme
- ii. (0.2 – 20cm) hasta el punto (0.3 – 30cm) el flujo no es uniforme.
- iii. (0.3 – 30 cm) hasta el punto (0.4 – 40 cm) el flujo no es uniforme
- iv. (0.4 – 40 cm) hasta el punto (0.8 – 80 cm) el flujo es uniforme.
- v. (0.8 - 80 cm) hasta el punto (1 – 100 cm) el flujo no es uniforme

Cabe aclarar que lo antes mencionado, no presenta ningún elemento al interior de la zona de pruebas que pudiese alterar el flujo del aire, es por ellos que la investigación plantea un análisis previo en que se observara la inducción de una

estructura al interior de la zona de pruebas para ello se retoman las alturas y la uniformidad del flujo antes mencionadas.

A continuación se mencionara el procedimiento detallado y las especificaciones a seguir para la disposición de la base de la estructura de visualización.

3.3. MODULACIÓN

En la conformación de la estructura se requiere la elaboración de módulos de 0.10 m * 0.10 m, estos se sobrepondrán en niveles verticales que conformaran una columna de soporte, con el fin de alcanzar una altura adecuada en la que los módulos no obstruyan e impida el desplazamiento del flujo del aire.

Los módulos soportaran una lamina de madera rectangular de 1,20 m * 0.80m, misma que se ubicara horizontalmente sobre el área de pruebas del túnel aerodinámico, al igual que los módulos, el fin de estas pruebas es corroborar o replantear, si es el caso, el diseño de la estructura para que esta no afecte la uniformidad del flujo del aire y ocasione turbulencia; ya que estos elementos estructurales son ajenos al área de pruebas del túnel aerodinámico.

Para la ubicación de los módulos de madera se plantea una alineación de ejes verticales y horizontales.

Alineación de ejes en vertical:

La disposición parte de la esquina inferior derecha de la superficie de la lamina de madera, al centro del eje (A) con una distancia de 0.15m en vertical y horizontal, posteriormente se traza la distancia entre el ejes (A y B) con una distancia de 0.50m. como se muestra en la .

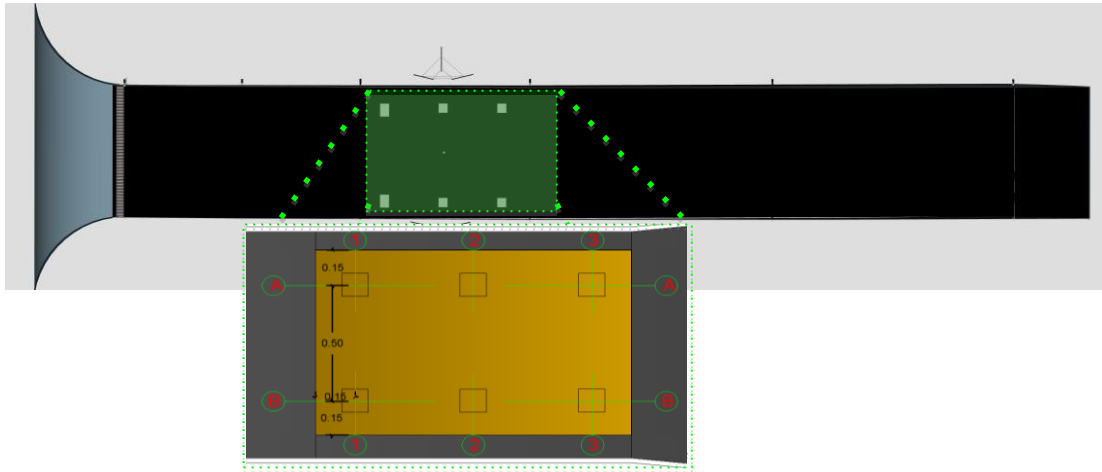


Figura 35 Alineación de ejes verticales para los módulos de soporte estructural

Alineación de ejes en horizontal :

Se plantearán tres alineaciones de ejes horizontales, se parte de la esquina inferior derecha de la lamina de madera que se encuentra en el interior de la zona de pruebas del túnel aerodinámico con una distancia de 0.15 m, lo que conformaría el eje 1, posteriormente se plantea el eje 2, se parte del centro modulo de madera o eje (1) con una distancia céntrica entre los módulos de madera de 0.45 m, para terminar con el eje 3, a una distancia de 0.45 m, del eje 2, al centro del modulo de madera 3 como se muestra en la Figura 35 y Figura 36.

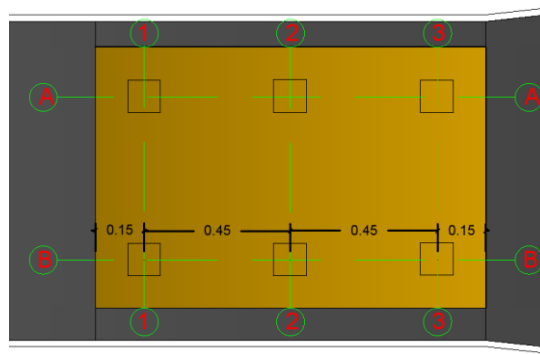


Figura 36 Alineación de ejes horizontales para los módulos de soporte estructural

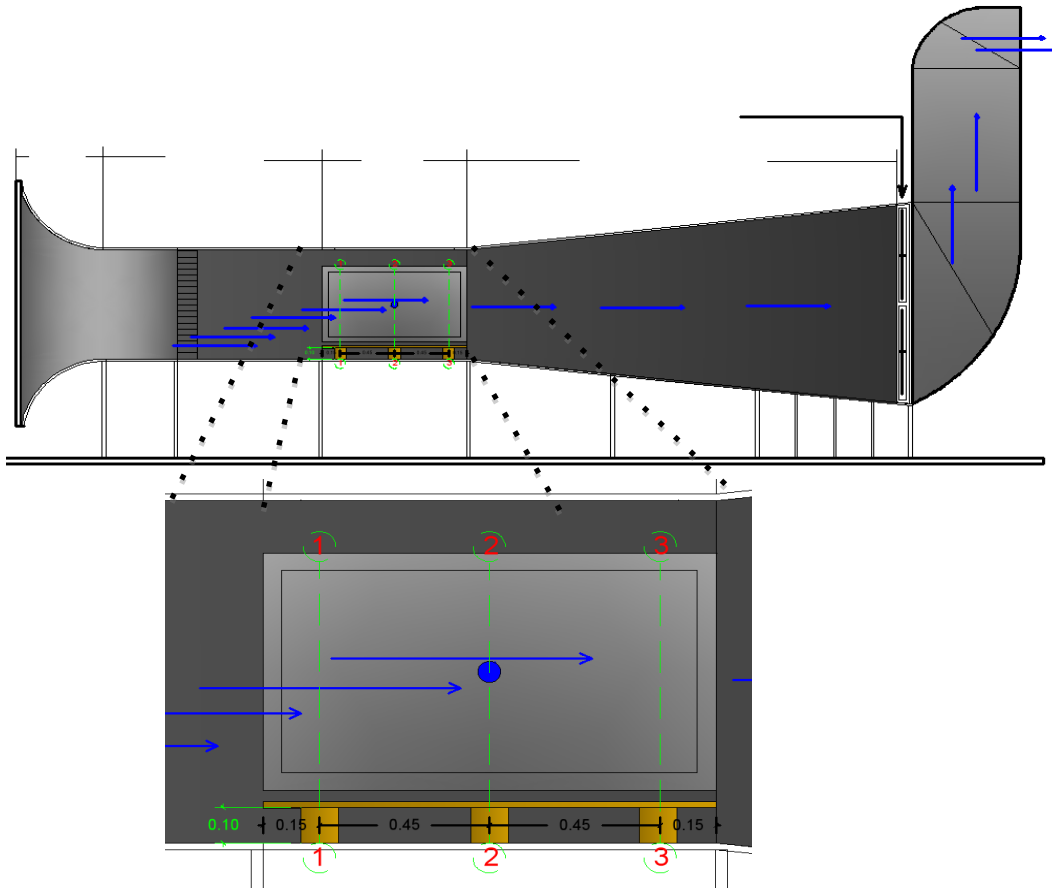


Figura 37 Alineación de ejes en vertical

Una vez planteados los ejes y alineados los módulos de madera de (0.10 * 0.10 m), se dará inicio a las pruebas con un flujo del aire en régimen turbulento, para encontrar la altura adecuada en la que el aire presente una trayectoria uniforme sobre la base de la técnica de visualización experimental. Se desarrollaran cuatro pruebas iniciales con alturas que parten de (0 - 0.10m) hasta (0.40m).

- a. La primera prueba parte de (0) Hasta la altura (0.10m)
- b. La segunda prueba parte de (0.10m) Hasta la altura (0.20m)
- c. La tercera prueba parte de (0) Hasta la altura (0. 30m)
- d. La cuarta prueba parte de (0) Hasta la altura (0.40m)

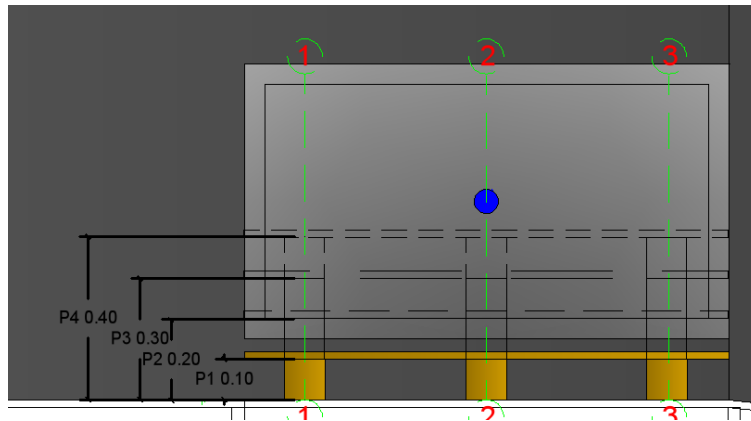


Figura 38 Orden de pruebas para determinar la altura de la base de la técnica experimental.

3.4. FUENTE DE ILUMINACIÓN Y PLANOS DE ILUMINACIÓN.

Trazado del grid sobre la base de la técnica experimental de visualización de envolventes arquitectónicas.

Ya construida la estructura de la técnica experimental y los modelos físicos tridimensionales, se plasmará un grid sobre la base de la técnica y al interior del área de pruebas del túnel aerodinámico que servirán como guía y a su vez de ejes de visualización en el trayecto del flujo del aire. A continuación se describe el trazado del grid.

Como primera medida vamos a referirnos en términos adimensionales; para ello se toman las dimensiones del prototipo o la envolvente geométrica como: la base (A) largo (A), ancho (B) y altura (h) como se muestra en la

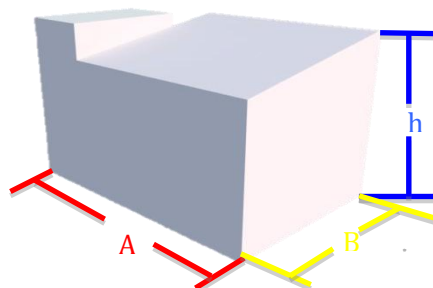


Figura 39 Medidas adimensionales del modelo físico tridimensional

El paso siguiente es ubicar el modelo de pruebas en el centro de la base de la técnica experimental. Después se trasladara la distancia del largo (A), del prototipo tres veces en vertical, sobre la base de la técnica experimental con la referencia de la fachada posterior derecha, al igual que en la fachada posterior izquierda se traslada la adimensión tres veces el largo (A), es decir, una equidistancia de (A) en la fachada posterior izquierda y derecha como se muestra en la Figura 40.

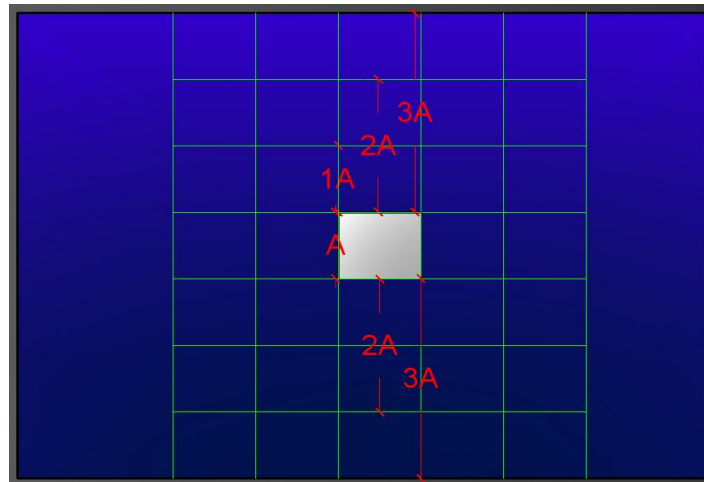


Figura 40 Trazado en planta del grid en horizontal

Para complementar el trazado de la cuadrícula en planta o base de la estructura de la técnica de visualización, se traslada en vertical la medida adimensional del ancho (B) del modelo a pruebas dos veces en barlovento y dos veces en sotavento como se presenta en la Figura 41.

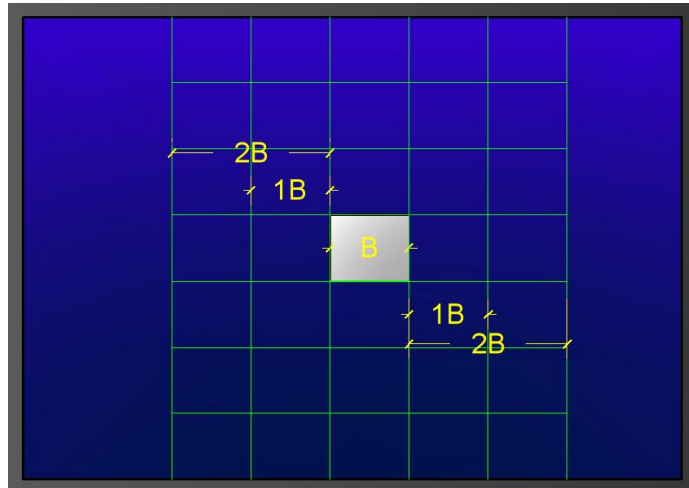


Figura 41 Trazado en planta del grid en vertical

3.5. TRAZADO DEL GRID EN ALZADO

El esquema de la cuadrícula en alzado, se trazara sobre las puertillas laterales del área de pruebas del túnel de viento, retomando las mediadas adimensionales de la altura (h) del modelo. Cabe mencionar que las puertillas laterales del área de pruebas del túnel aerodinámico de la (UAM –Azcapotzalco) son desmontables y se cubrirán con un material opaco dejando descubierto solo una circunferencia con un diámetro de 0.05 m tipo mirilla en el centro de la puerta, con el fin de ubicar un eje de visualización, donde se instalara la cámara de alta velocidad.

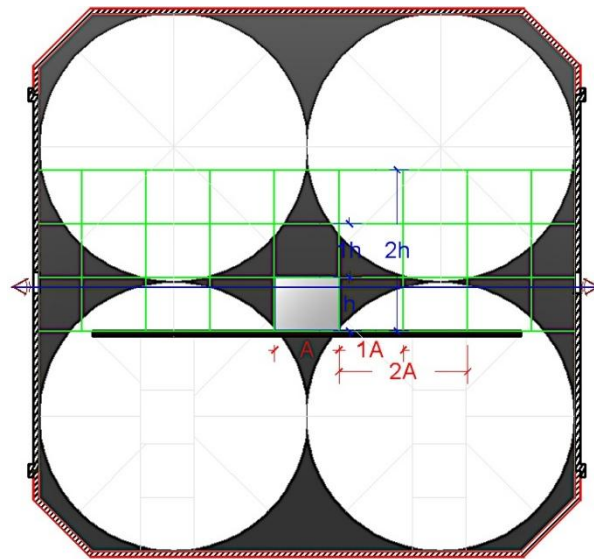


Figura 42 Trazado del grid en alzado al interior del túnel aerodinámico

PLANOS DE ILUMINACIÓN DEL FLUJO DEL AIRE SOBRE UN PROTOTIPO DE ESTUDIO AERODINÁMICO EN EL TÚNEL DE VIENTO.

El flujo del aire no es de fácil percepción para el hombre y se le dificulta la observación del flujo sin la aplicación o utilización de equipos altamente sofisticados y costosos, es por ello que en la presente investigación se plantea una técnica experimental de visualización en la que solo se emplearan equipos de fácil manipulación y viables económicamente tanto en los materiales del los prototipo de las viviendas, las fuentes lumínicas y las partículas de visualización.

En el inciso anterior se mencionó el trazado del grid sobre base de la técnica experimental, y a continuación se describe el trazado de los planos de iluminación, así como la forma de proyección de los mismos.

Se plantean 5 ejes de iluminación que parten del centro del volumen; ya que es la zona donde teóricamente se presenta la mayor presión estática, misma que posteriormente se irradia concéntricamente sobre la superficie como se presenta en la Figura 43 y la Figura 44.

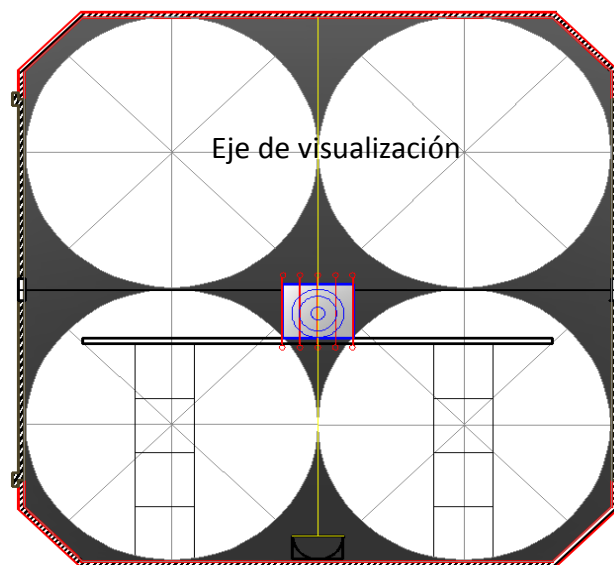


Figura 43 Eje central de iluminación

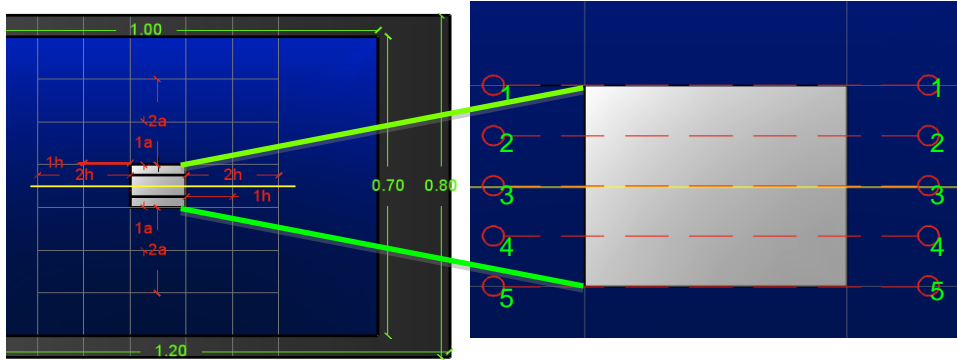


Figura 44 Planos de iluminación.

Posteriormente se trazan los planos subsecuente que denominaremos:

1. Eje lateral derecho
2. Eje central derecho
3. Eje central
4. Eje central izquierdo
5. Eje lateral izquierdo

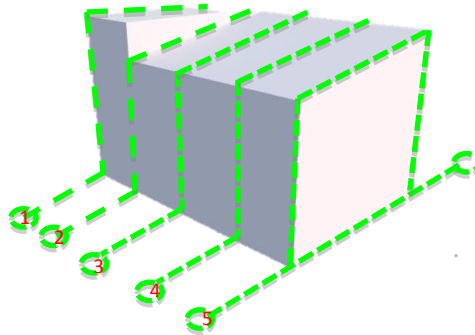


Figura 45 Ejes de iluminación en perspectiva

Cabe aclarar que dependiendo de la complejidad del análisis, y dado el caso, si este lo llegara a requerir, se incrementaría el numero de planos y se estudiará la viabilidad de la súper posición de estos planos de iluminación con la finalidad de llegar a una visualización global de todo un conjunto de envolventes arquitectónicas.

REGIONES DE ANÁLISIS DEL FLUJO DEL AIRE SOBRE LOS PROTOTIPOS

Los análisis que publica la literatura en cuanto al flujo del aire en las envolventes arquitectónicas, se observan que la trayectoria del aire, es limitada a planos que reducen la información a una sección del flujo, y muestran los movimientos que son fácilmente identificables en una herramienta como el túnel aerodinámico y es el resultado de una serie de movimientos del aire que actúan en conjunto pero que no se reportan y se ignoran, por ende, se desarrolla una limitante para el lector en relación a la complejidad de la trayectoria del aire. Es por ello que la investigación se plantean regiones de análisis para el análisis del flujo del aire y reportar detalladamente, la cadena de movimientos previos a la conformación de un vórtice de recirculación. Para obtener dichas visualizaciones, se establecerán regiones de análisis que mencionaremos a continuación y se puede observar en la Figura 46:

1. Región previa a la interacción flujo del aire en sotavento.
2. Región de interacción inicial del flujo o colisión del flujo sobre la fachada.
3. Región de continuidad del flujo sobre el modelo.
4. Región de sombra de la trayectoria del flujo de aire en barlovento.

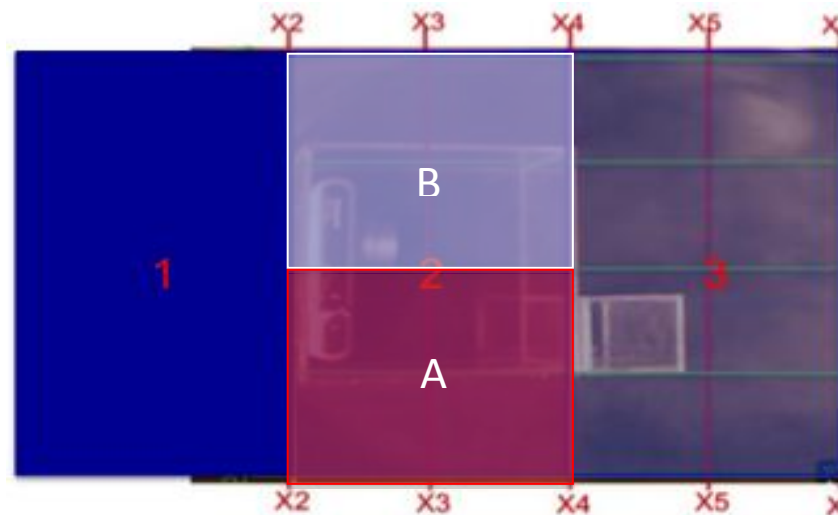


Figura 46 Regiones de análisis del flujo del aire sobre los prototipos

3.6. INSTRUMENTOS Y EQUIPO DE VISUALIZACIÓN .

El aire es un elemento imperceptible a simple vista en los seres humanos, para poder visualizar el efecto que este genera sobre cualquier superficie y específicamente sobre las edificaciones o envolventes arquitectónicas se requiere de dispositivos sofisticados y aparte de personal calificado para su respectivo uso, sin mencionar el alto costo de estos equipos.

Uno de los objetivos de esta investigación es omitir el uso de equipos de alta gama en la concepción de los resultados de imagen, y aplicar los principios físicos de estos con equipos que se encuentran disponibles en el mercado y en la UAM-Azcapotzalco, como una cámara de HD Casio Exilim PRO EX F1 y una maquina generadora de partículas de humo, así como sistema de iluminación de más de 15.000 lúmenes.

Las características que tiene el equipo de captura de imagen y video son las siguientes:

GENERALIDADES			
Distancia focal:	Digital	7,3 - 87,6 mm	
	35mm	36 - 432 mm	
Zoom	Óptico	12x	
	Digital	4x	
Abertura	máxima	(W-T)	f2,7 - f4,6
	mínima	(W-T)	f15
Enfoque	Automático	si	
	manual	si	
	normal	40cm	infinito
	macro	5cm	50cm
CONTROL DE EXPOSICIÓN			
Compensación de exposición	Rango	de -2 a 2 EV	
	Pasos	1/3	
Velocidad obturación de	Máxima	1/40000 s	
	Mínima	60 s	
	Modo B	no	
Sensibilidad	Mínima	100 ISO	

GENERALIDADES		
	Máxima	1600 ISO
Medición	Ponderada al centro	sí
	Puntual	sí
	Matricial	sí
	Otros	no
CONTROL DE DISPARO		
Disparo simple	Archivos	JPEG, RAW
	Resoluciones (en píxeles)	2.816 x 1.586
		2.816 x 1.872
		2.816 x 2.112
		2.304 x 1.728
		2.048 x 1.536
		1.600 x 1.200
		640 x 480
Disparo en ráfaga	JPEG, 60 imágenes, 60 fps, 2.816 x 2.112 píxeles	
	JPEG, 20 imágenes, 7 fps, 2.816 x 2.112 píxeles	
	3 fps, 2.816 x 2.112 píxeles	
Video	Archivo	Mov
	Formato de compresión	
	Tipo	1.920 x 1.080 píxeles, 60 fps, 29 min
		1.280 x 720 píxeles, 30 fps, 29 min
		640 x 480 píxeles, 30 fps, sin límite
		512 x 384 píxeles, 300 fps, sin límite
		432 x 192 píxeles, 600 fps, sin límite
		336 x 96 píxeles, 1200 fps, sin límite



Figura 47 Cámara de alta velocidad

Conociendo ya las características del equipo con el que nos apoyaremos, el siguiente paso es de suma importancia; ya que se tienen que cuidar con detalle la ubicación de los mismos para que no interrumpen la continuidad en el registro del flujo del aire y el volumen de las partículas permita una captura de las imágenes optima del haz de luz o plano de iluminación con un contraste legible del fenómeno de estudio, es decir, que solo capture el haz de luz del plano que se requiere analizar ignorando o estableciendo una transparencia al flujo de partículas circundante.

La cámara de captura de imagen y video, se orientara sobre diversos plano e inclinaciones formando ejes de visualización, lo cual permitirán una observación global de la envolvente arquitectónica basados en vistas aéreas y a nivel de la base. A continuación describiremos la conformación de los planos.

Eje de visualización y captura de imagen 1:

Se ubica horizontalmente sobre el túnel aerodinámico, aparte del equipo de imagen se utiliza un tripie ajustable a una altura de 1.37 m, perpendicular a el plano de iluminación como se aprecia en la Figura 48

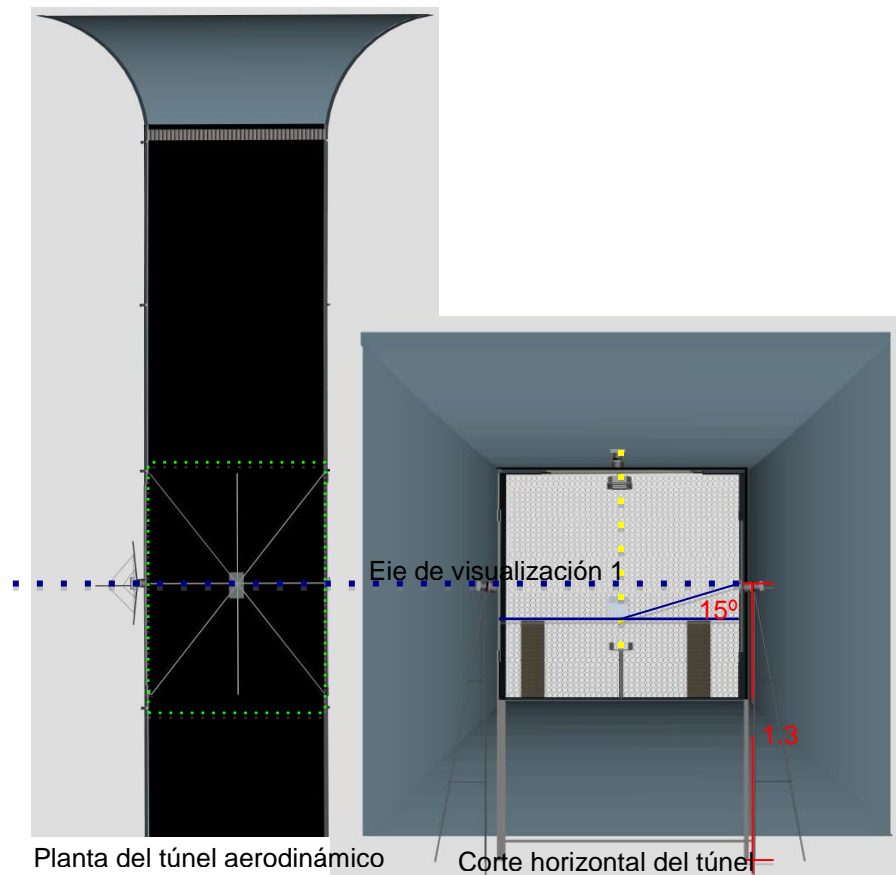


Figura 48 Equipo de captura de imagen

Eje de visualización y captura de imagen 2:

La cámara de captura se oriento a 45° con respecto a el eje 1, en sentido contrario a las manecillas del reloj, se observa en la , esta alineación se plantea con el fin de obtener una visual a ras de piso sobre el objeto de estudio, lo cual enfocara la fachada principal y la fachada lateral izquierda del la envolvente.

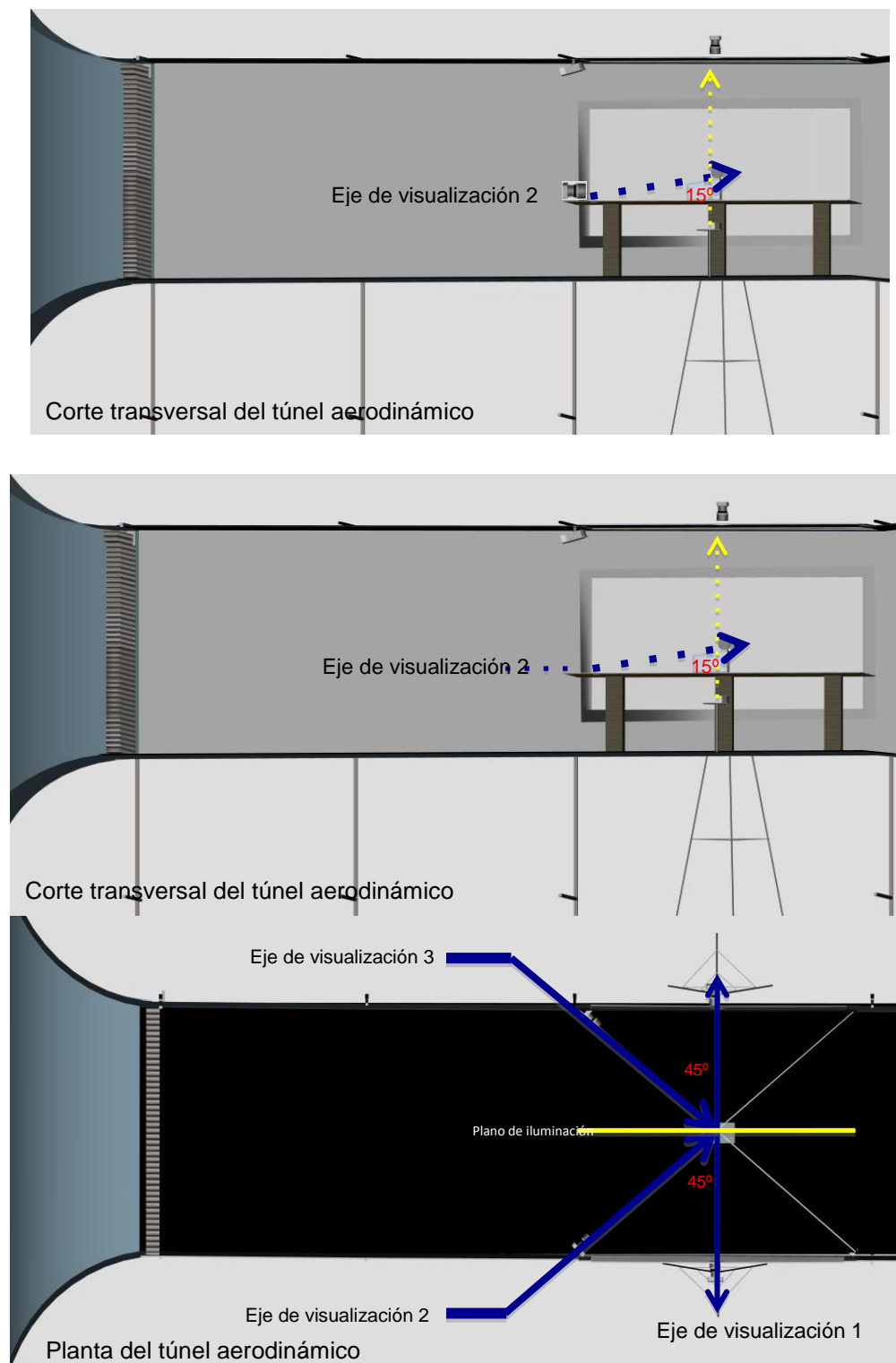


Figura 49 Ejes de orientación de los dispositivos de captura de imagen

Eje de visualización y captura de imagen 3:

En este eje los dispositivos de captura se orientan a 45^a con respecto al plano de iluminación en sentido de las manecillas del reloj, lo cual, mostrara en primer plano las fachadas lateral derecha y la principal como se muestra en la Figura 49.

Eje de visualización y captura de imagen 4:

La perspectiva que nos mostrara este eje es una vista aérea con un Angulo de 90° con respecto a plano de iluminación como se muestra en la Figura 50.

Eje de visualización y captura de imagen 5:

La captura de imagen se empleara para sotavento, y arras de piso. Este eje se orienta paralelo a el plano de iluminación. El dispositivo de ubicara en el interior del volumen de análisis como se muestra en la Figura 50.

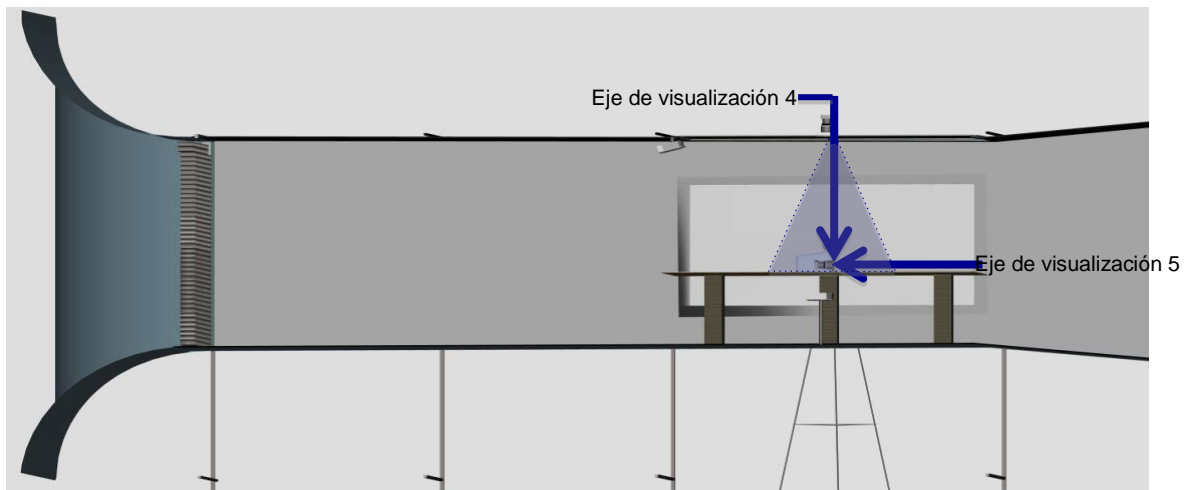


Figura 50 Sistema de ejes de visualización 4 y 5 dentro del túnel aerodinámico.

3.7. SISTEMA DE ILUMINACIÓN:

El sistema de iluminación que se plantea es de bajo consumo energético, en relación con otros sistemas que se utilizan en estudios aerodinámicos y en


especial con el sistema de mayor precisión la velocimetria de imagenes de partículas o como lo indican sus siglas en ingles (PIV), este se basa en la iluminación laser y requiere de altos recursos económicos.

En el sistema de iluminación que emplearemos en la técnica experimental, se fundamenta bajo una iluminación focalizada que genere un flujo luminoso alto y uniforme haz de luz sin que este genere un albedo sobre la geometría, es decir, que en el dispositivo de captura de imagen o el eje de visualización, se observe la trayectoria del aire o el fenómeno que se desarrolla sobre la geometría, sin que este afecte el eje de visual o el resultado obtenido mediante los dispositivos de captura de imagen con un deslumbramiento. Así como también emplearemos una iluminación frontal para la perspectiva aérea; ya que esta aporta mayor brillantes a los colores, los resultados son confiables y es de fácil manipulación. Para conformar este sistema a continuación describiremos las instalaciones y el equipo a utilizar como se muestra en la Figura 51.

Las fuente lumínica con las que se cuenta son dos dispositivos con las siguientes características como se presenta en la Tabla 2:

Fuente lumínica 1 Philips eW Reach Powercore :

- luz blanca de color sólido arquitectónico
- Tecnología Led Powercore que acepta directamente voltaje de línea para facilitar la instalación.
- Potencia de más de 10.000 lúmenes, basados en LED de iluminación de grandes estructuras y objetos.
- Lentes de propagación de 8 °, 13 °, 23 °, 40 °, 63 °, y una relación asimétrica de 5 ° x 17 °
- Rango de entrada de 100 a 240VAC.

Especificaciones eW Reach Powercore LED			
		2700 K	4000 K
	Angulo de	8° / 13° / 23° / 40° / 63°	
	Apertura		
		5° x 17° propagación del lente asimétrica	
	Lumenes	8,612 (en la unidad completa)	11,392 (en la unidad completa)
	Eficacia (lm/W)	34.4 (en la unidad completa)	45.6 (en la unidad completa)

Especificaciones eW Reach Powercore LED		
CRI	83.1	80
Tensión (V)	100-240 VAC, auto-switching, 50/60 Hz	
Potencia Total	(W) 250W	

Tabla 2 Especificaciones de la fuente lumínica

Plano de dimensiones

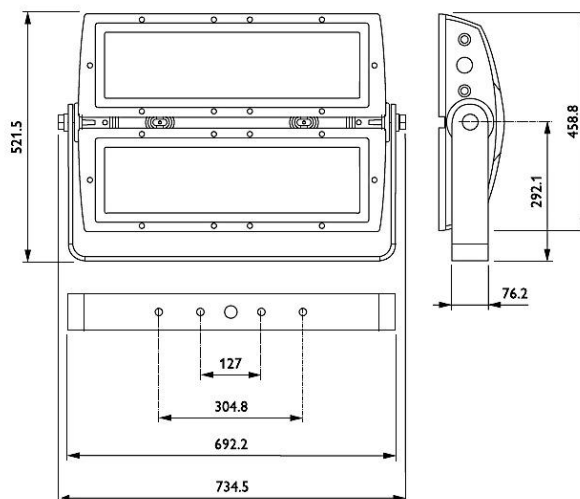


Figura 51 Dimensiones de la fuente lumínica

CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el estudio experimental en donde se utilizó un túnel aerodinámico de baja velocidad ubicado en el Laboratorio de Diseño Bioclimático de la División de Ciencias y Artes para el Diseño del Departamento de Medio Ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

En este trabajo se utilizó una modificación al sistema de referencias con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados, también se planteó un análisis a través de la separación de regiones de estudio, los cuales facilitan enormemente la descripción de los fenómenos observados en videos grabados a alta velocidad.

Una gran parte de la información se encuentra en grabaciones de video sin embargo se utilizan las imágenes que se consideran más representativas de lo que se desea presentar en este capítulo.

Se emplea un código de color para separar los diferentes fenómenos que se pueden reproducir en el túnel de viento pero que es relativamente difícil visualizar sin el apoyo de equipo de grabación de alta velocidad.

Aún cuando la velocidad del aire dentro del túnel se mantuvo constante, consideramos que la información analizada servirá para una nueva interpretación de los fenómenos que se consideran cuasi-estacionarios y esta consideración puede afectar notablemente a la eficiencia de las propuestas realizadas en el diseño bioclimático.

SISTEMA DE REFERENCIAS

En la etapa del análisis de resultados de los experimentos de la incidencia del flujo de aire sobre modelos arquitectónicos mediante la técnica de visualización experimental.

Se establecieron áreas o zonas de análisis con el fin de documentar detalladamente el avance e interacción del flujo del aire sobre edificaciones arquitectónicas para ello se plantearon regiones de análisis que se describen a continuación:

Región 1

La región uno es aquella donde interactúa el flujo del aire sobre la geometría, en esta región se visualiza el flujo previo a la interacción con el modelo arquitectónico sobre la base y posteriormente como asciende sobre el plano vertical o la fachada principal de la geometría

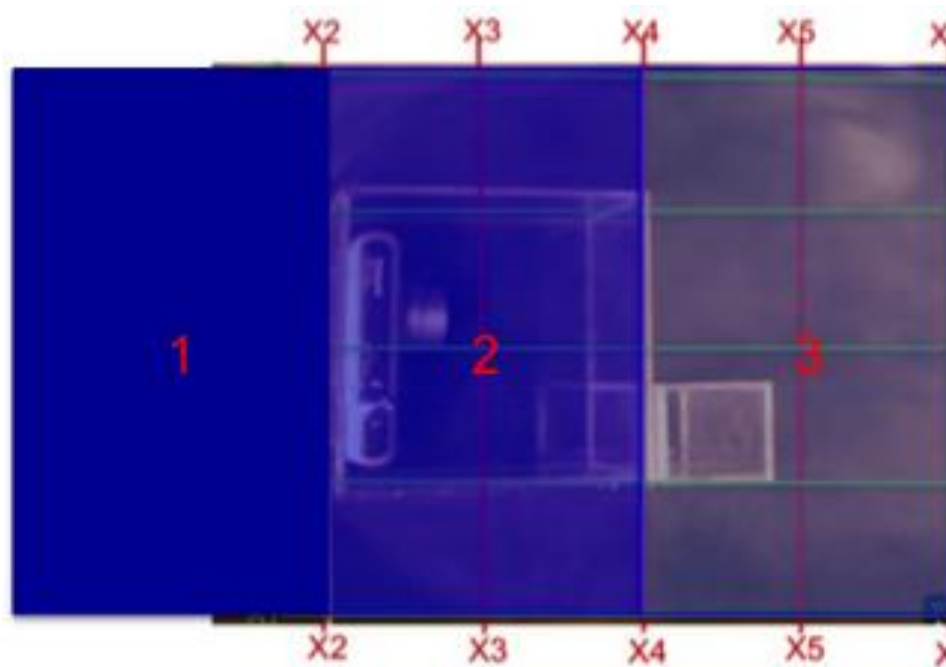


Figura 52 Regiones de análisis en el modelo A.

Región 2.

La segunda región se observa el flujo de aire que interactúa sobre la cubierta del volumen, y sobre las fachadas laterales para observar el flujo de aire sobre las fachadas esta región se dividió en dos sub-regiones la 2A y 2b.

Subregión 2A

En esta sub región se estudiara la interacción del flujo de aire que toma una dirección hacia la izquierda con respecto a el flujo inicial, es decir que se analizara la fachada posterior derecha.

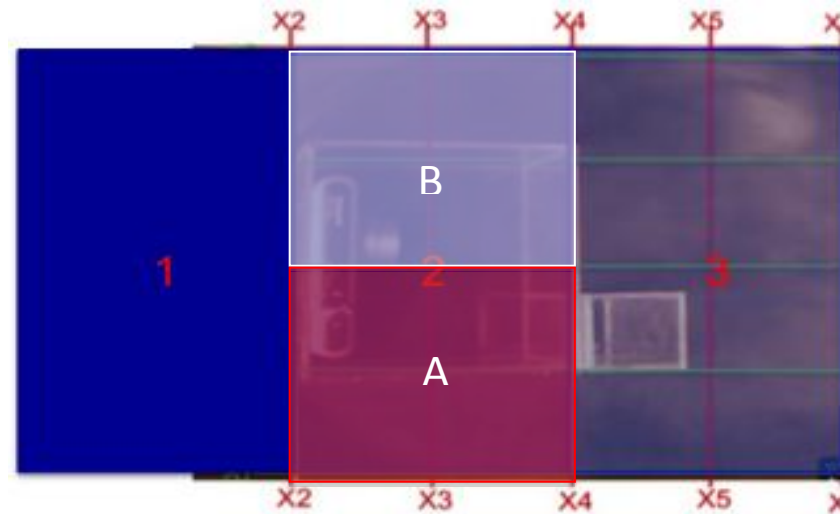


Figura 53 Sub-regiones de análisis en el modelo A.

Subregión 2B

La sub Región B, es aquella donde la dirección del flujo de aire tiene una trayectoria hacia la derecha y en la que se analizara la interacción del flujo de aire en la fachada izquierda.

Región 3.

En esta región se analizara la trayectoria de flujo en barlovento, sobre la fachada posterior izquierda. La tercera región es aquella donde la trayectoria del flujo de aire de aire es en barlovento.

Antes del análisis de la interacción del flujo del aire sobre los modelos geométricos, es necesario mencionar que se plantaron ejes de visualización del flujo, tanto en planta como en perfil, estos ejes corresponde a longitudes adimensionales tomadas del modelo a prueba.

Las longitudes son basadas en los casos de estudio de la investigación y para ello, se toman el largo y ancho de las viviendas o modelos a prueba, para

posteriormente trazar el grid o los ejes de visualización sobre la base de la técnica experimental, y las paredes verticales del área de pruebas del túnel aerodinámico.

Para el trazado de los ejes en el plano horizontal (X), se toma la mitad del largo de la vivienda, es decir, que del eje X a X1 es $(1/2 L)$ una vez el largo de la vivienda, en el eje X a X2 es $(1L)$ una vez el largo vivienda.

El trazado en el plano vertical (Z), se toma la altura de la vivienda o el modelo a escala, a partir del eje Z a Z1 es $\frac{1}{2} h$, es decir, un medio del alto de la vivienda, de Z a Z2, es (1) , una vez el alto de la vivienda.

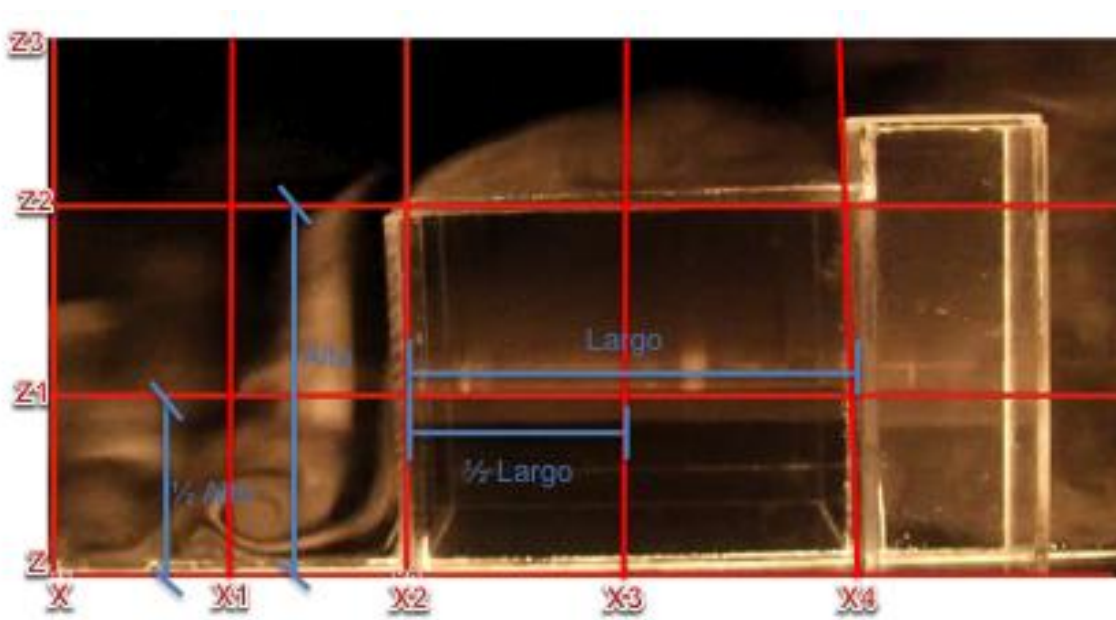


Figura 54 Ejes de referencia en el modelo A

4.2. CASO DE ESTUDIO A

Análisis de la incidencia del flujo del aire en la zona 1 en el modelo A.

El flujo de aire posteriormente de pasar sobre los tubos enderezadores y al llegar sobre la zona de pruebas presenta un flujo completamente desarrollado, sobre la base de la técnica de visualización, al ingresar a la región de análisis en eje (X y Y) su desplazamiento es uniforme y se representa con vectores de color azul, se puede ver en la

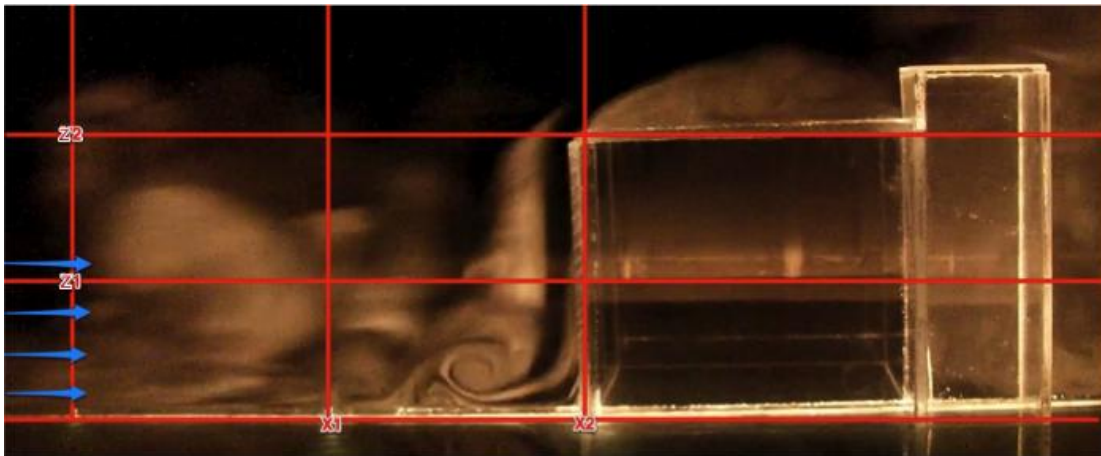


Figura 55 Flujo completamente desarrollado en modelo A.

El flujo de aire continua su trayectoria lineal hasta el eje ($Y \frac{1}{4}$) ($X \frac{3}{4}$) en este punto el flujo presenta un movimiento descendente e inicia la primera etapa de la formación de un vórtice que denominaremos vórtice A.

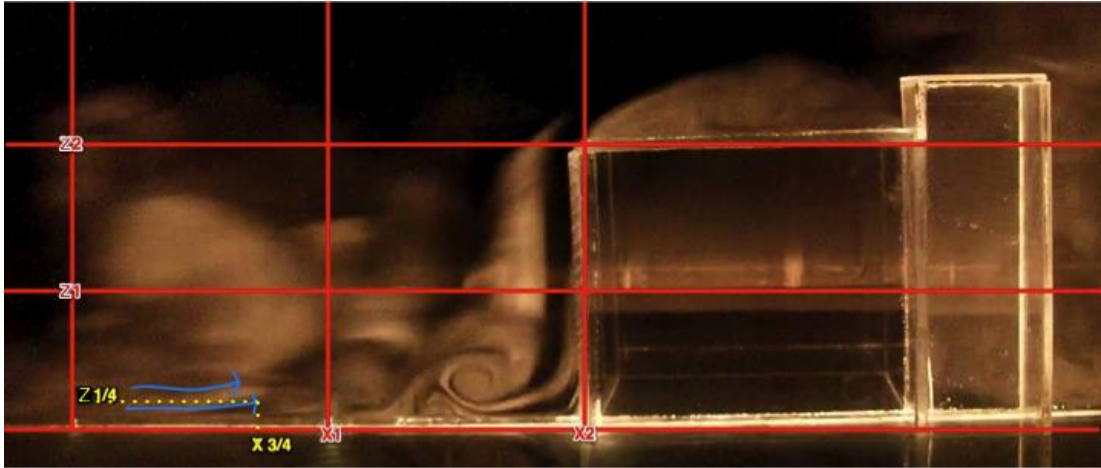


Figura 56 Comportamiento del flujo de aire en el modelo A.

El flujo de aire al descender colisiona con la base de la técnica de visualización en el eje ($X \frac{3}{4}$) y asciende en sentido contrario a la línea de flujo.

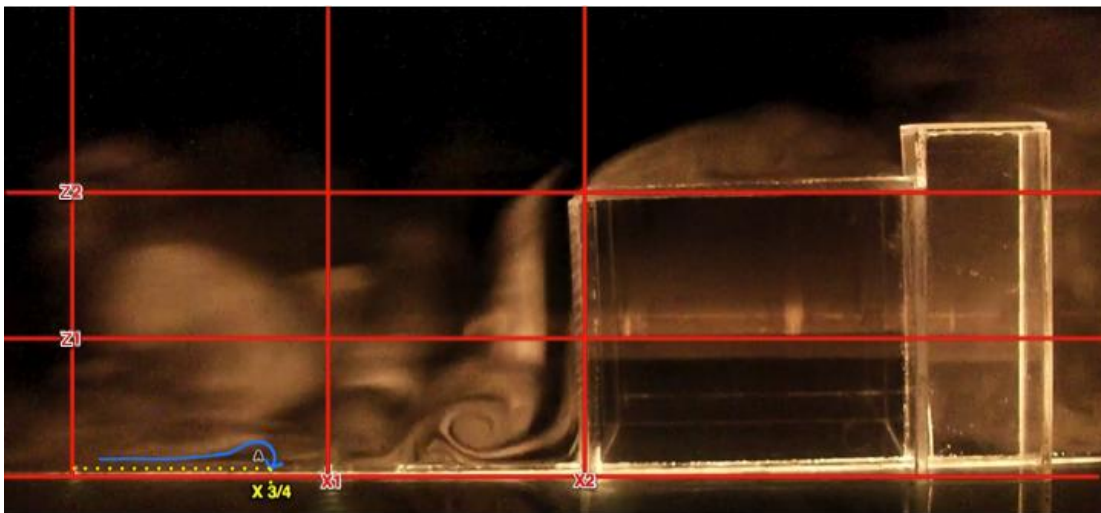


Figura 57 Descenso del flujo de aire y formación vórtice A del modelo A.

Al colisionar, el flujo continua su trayectoria ascendentemente sobre los ejes ($X \frac{3}{4}$) ($Y \frac{1}{16}$) (vector rojo) formando una elipse, que en este caso, la mencionaremos como la formación del vórtice A como se muestra en la Figura 57 y en la Figura 58

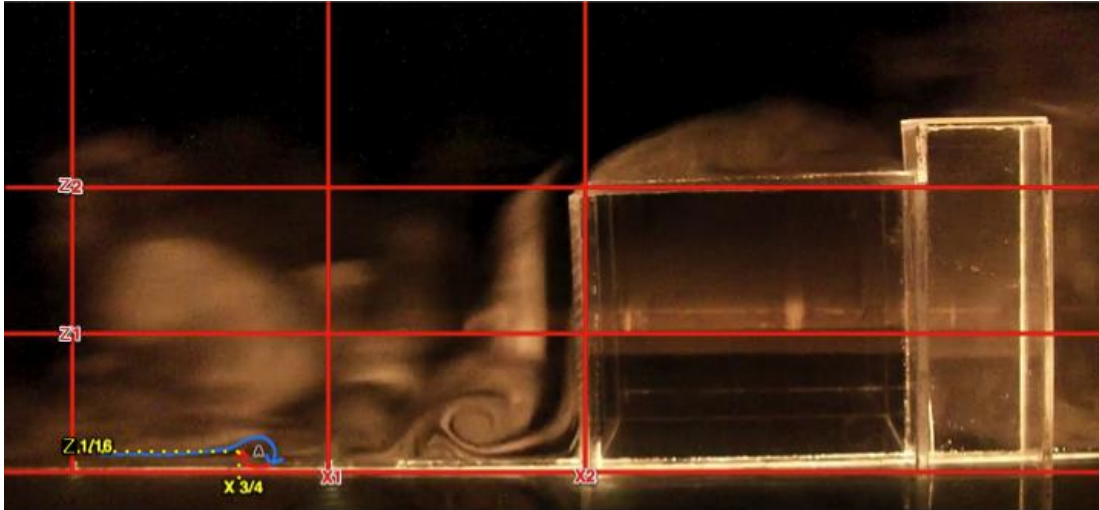


Figura 58 Movimiento elíptico Vórtice A del modelo A.

El flujo se desplaza con un movimiento en forma de espiral desde los ejes ($X \frac{1}{16}$) ($X \frac{3}{4}$) linealmente hasta los ejes ($X \frac{1}{16}$) continuando su trayectoria en forma helicoidal hasta los ejes ($X \frac{1}{4}$).

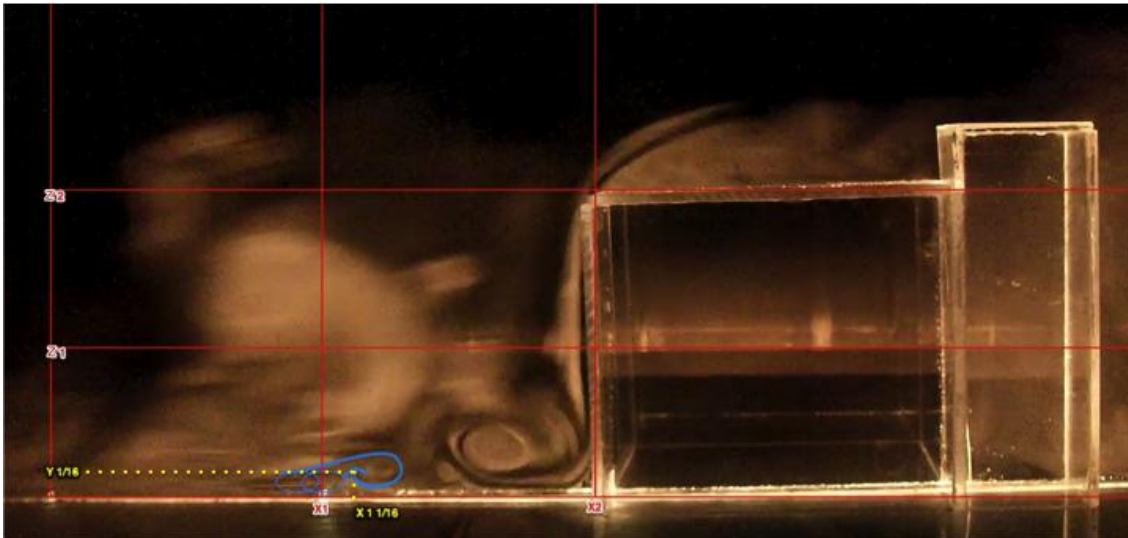


Figura 59 Desplazamiento en espiral o vórtice A del modelo A.

Posteriormente el flujo continua su trayectoria horizontalmente con movimientos en espiral o helicoidal, hasta colisionar con un estancamiento de aire (vector amarillo), sobre los ejes ($X \frac{3}{8}$) ($Y \frac{1}{8}$).

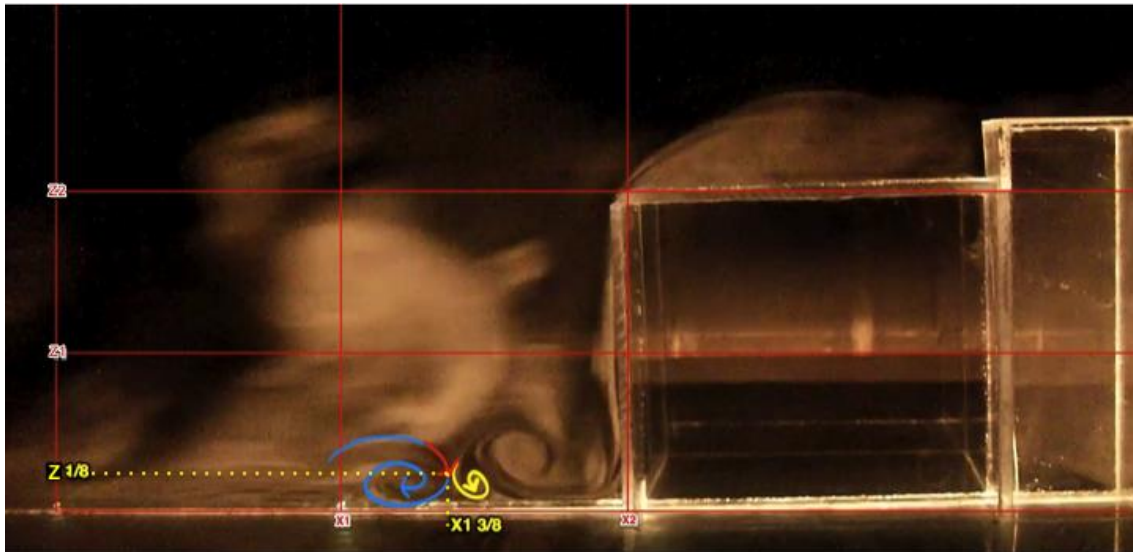


Figura 60 Colisión de la trayectoria del aire sobre el estancamiento del modelo A.

Sobre los ejes ($X1 \frac{3}{8}$) ($Y \frac{1}{8}$) el flujo que se desplaza con un movimiento en espiral, (vector azul), continua con una trayectoria ascendente, sobre el estancamiento de aire (vector amarillo) resobándolo por encima de este como se muestra en la Figura 61

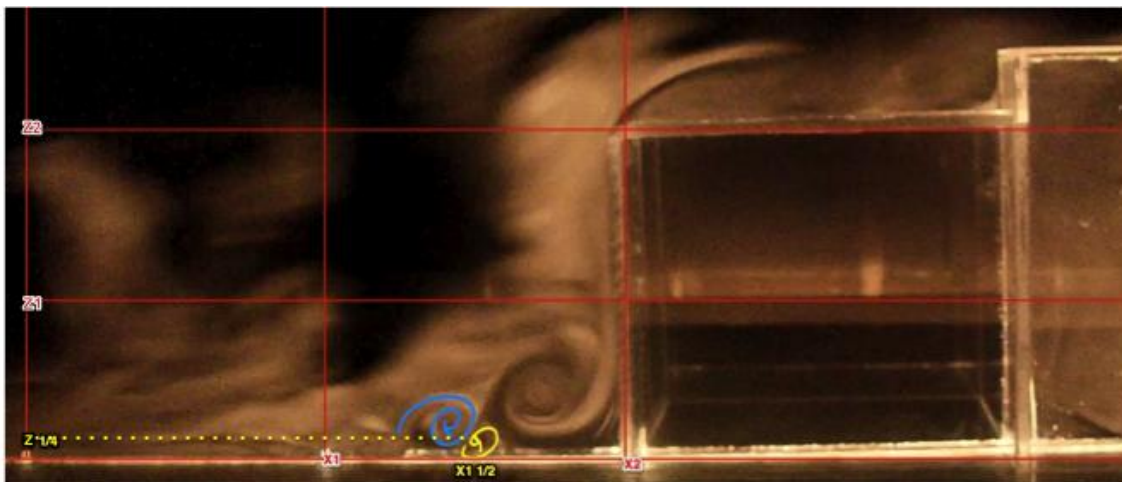


Figura 61 Ascenso de aire sobre el estancamiento de aire del modelo A.

Una línea de flujo que se desplaza sobre la formación del vórtice B, la cual, se representaremos con el vector de color rojo influye en la formación del vórtice C, esta línea independiente colisiona con vórtice B, envolviéndolo e iniciando la formación del vórtice C como se muestra en la Figura 62.

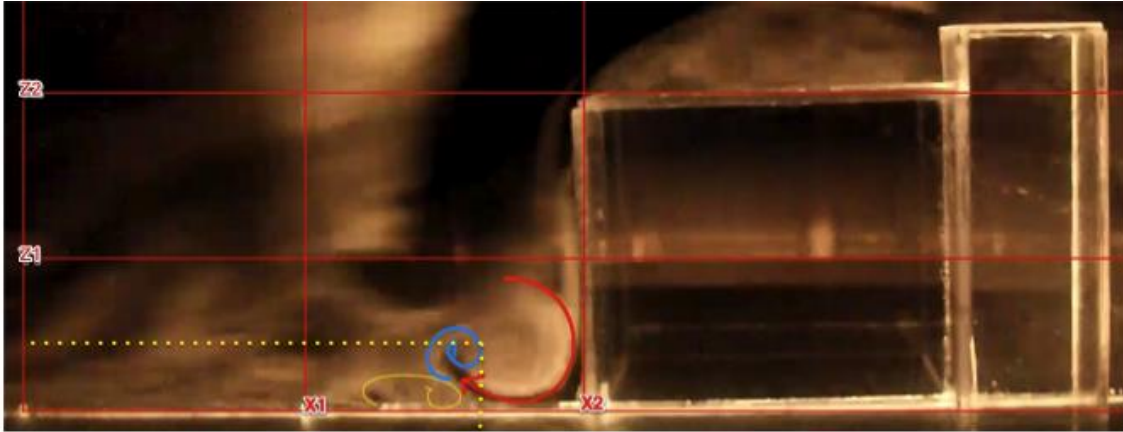


Figura 62 Tercera línea de flujo del modelo A.

El vórtice B, se desplaza ascendentemente sobre el estancamiento de aire con un movimiento horizontal (vector amarillo), este lo intercepta un tercer flujo en los ejes($Y 15/16$) ($X1 7/8$) que lo rodea por completo y se observan dos movimientos en uno, es decir, el que se destaca la tercera línea de flujo(vector rojo) que se desplaza descendientemente en sentido de las manecillas del reloj e inmerso en este se encuentra el vórtice C, que gira helicoidalmente con una trayectoria descendente, al interior del tercer flujo(vector rojo) como se observa en la

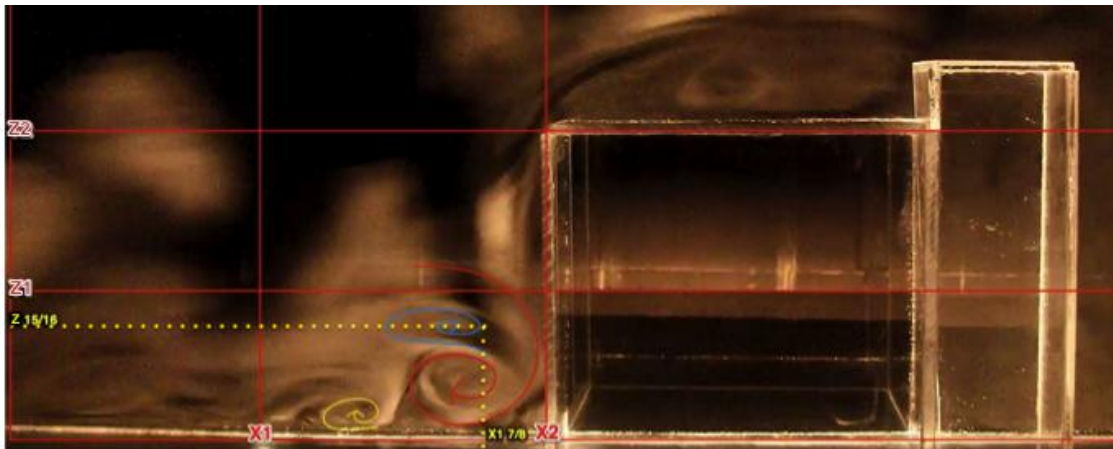


Figura 63 Flujo envolvente del vórtice B e inicio del vórtice C del modelo A.

Ya agrupados el vórtice B, en los ejes (con el tercer flujo(vector rojo) continua su desplazamiento en ascenso en forma helicoidal, al ir descendiendo el flujo en

espiral o vórtice B, se desplaza en el sentido de las manecillas del reloj y este se inicia a compactar como se presenta en la Figura 64

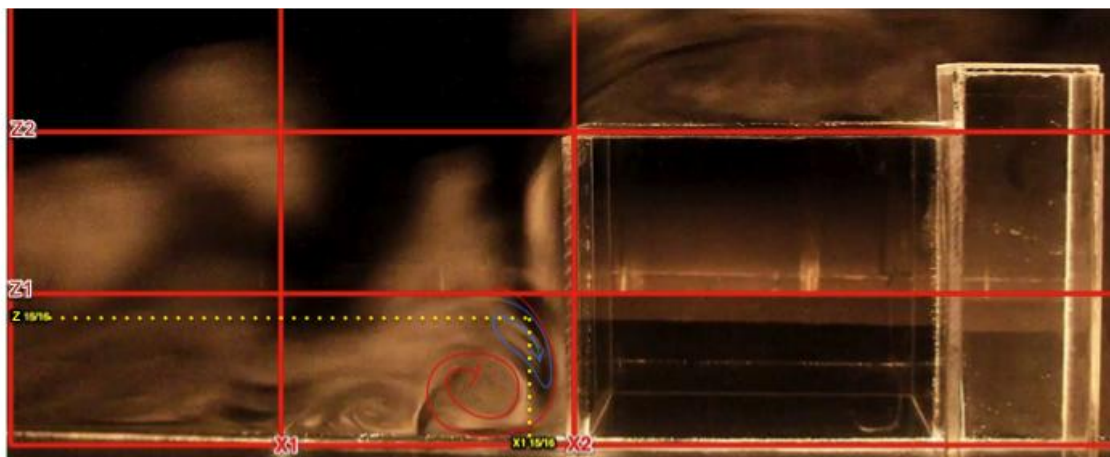


Figura 64 Agrupación del vórtice B, con la formación del vórtice C del modelo A.

Los desplazamientos de aire se fusionan en los ejes (Y1/2) (X1 15/15), a medida que el flujo continua su trayectoria en descenso e inician a observarse un movimientos en espiral, el cual, compacta el flujo B, para posteriormente fusionarlo por completo e iniciar una trayectoria con un solo flujo que sería el vórtice C como se aprecia en la Figura 65

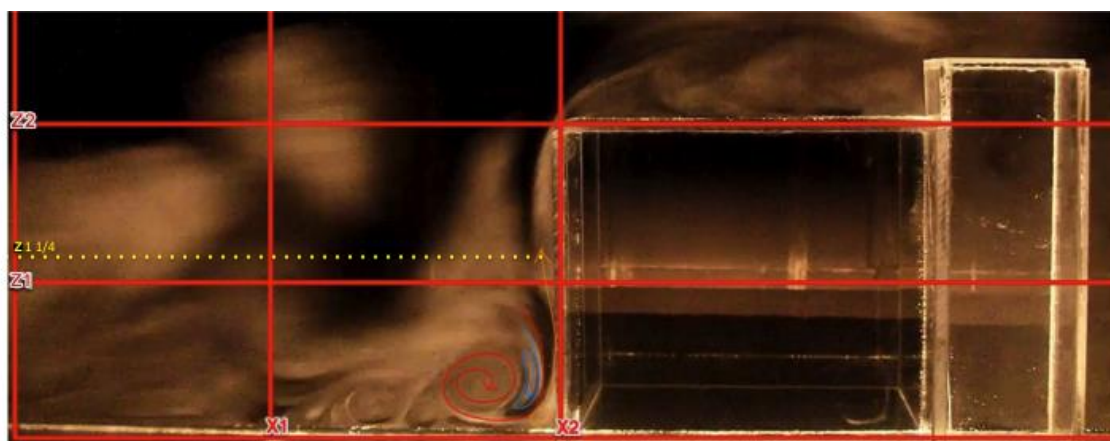


Figura 65 Fusión de flujo y formación del vórtice C del modelo A.

Ya formado completamente el vórtice C, se desplaza en forma de espiral y colisiona con la fachada de la vivienda, dividiendo el flujo en diferentes direcciones tanto laterales derecha e izquierda como ascendente y descendente.

El flujo ascendente se desplaza sobre la pared de la fachada principal, hasta llegar a la región de análisis 2. El movimiento ascendente del flujo se origina por la diferencia de presiones que genera la colisión del vórtice C, sobre la facha; ya que el aire se desplaza de mayor a menor presión.

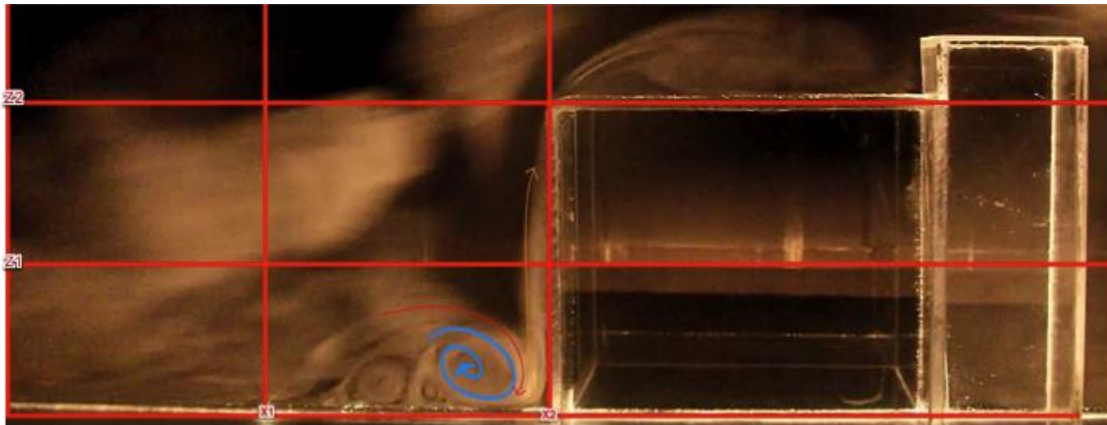


Figura 66 Flujo ascendente sobre la fachada del modelo A.

Análisis del la región 2 en el volumen A.

En la región dos se observan tres trayectorias de flujo que describiremos a continuación:

El primer flujo que describiremos es aquel que continua la trayectoria en ascenso vector verde sobre los ejes(X2) (Y – Y3) desde la región uno, hasta la región dos, interactuando y deslizándose sobre el muro de la fachada principal del modelo a escala A. Este flujo de aire en el ángulo de intercepción que se forma por la cubierta y el muro de la fachada desarrolla un movimiento de giro de 90° grados para continuar la trayectoria sobre la cubierta. Ver Figura 67

El segundo flujo de aire se desplaza paralelo a el primer flujo de aire, vector azul sobre los ejes (X1 7/8) (Y – Y3), este continua con una trayectoria en ascenso, vertical sobre la fachada principal hasta llegar a la intersección, de la cubierta y el muro de la fachada principal. En este punto hace un giro de 45 grados y continua su trayectoria sobre la cubierta. Ver Figura 67

El tercer flujo de aire es completamente desarrollado y se desplaza horizontalmente por arriba del eje (Y1) vector rojo, hasta colisionar con el ángulo de intercepción de la cubierta y el muro de la fachada. Ver Figura 67

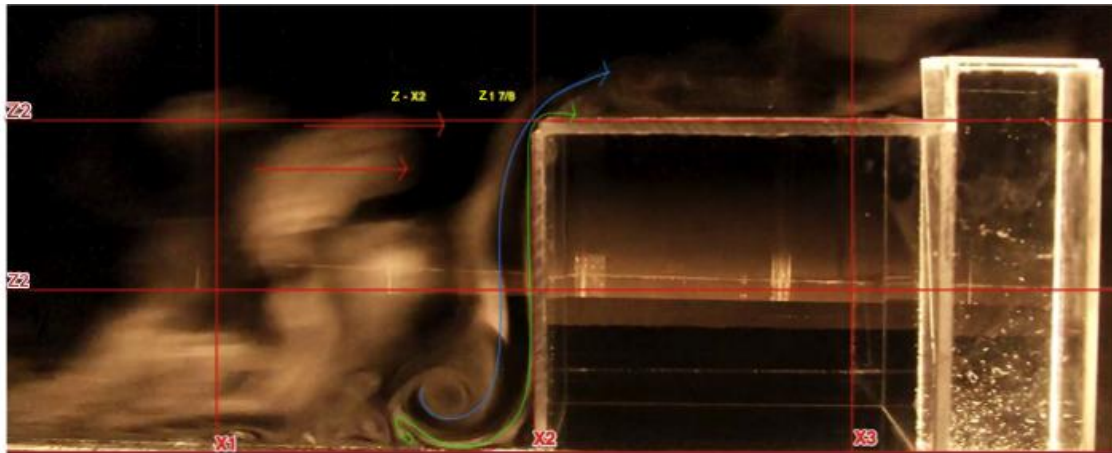


Figura 67 Flujo de aire en ascenso sobre la fachada del modelo A.

Para el análisis de la región dos enfocamos, la visual sobre los ejes (X2 – X3) (Y3), para ello, se realizo un acercamiento a la cámara de alta velocidad con un zoom 2X, con el fin de captar el fenómeno en esta área de estudio.

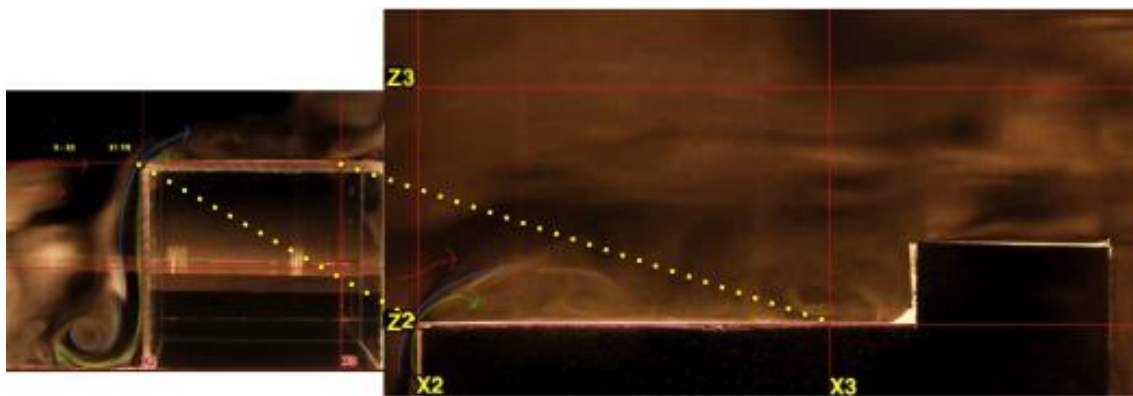


Figura 68 Región de análisis 2 del modelo A.

En la Figura 69 se aprecia el flujo de aire que presenta un movimiento ascendente que proviene de la región 1 en dirección a la región 2, el cual, se desliza sobre el muro de la fachada frontal, hasta el ángulo de intercepción de la cubierta desarrolla un giro descendente en el ángulo intercepción, este giro es el resultado

de la colisión del el flujo 1 (vector verde) y el flujo de aire 2 dos (vector azul) y continua su trayectoria formando una elipse en los ejes ($Y2 \frac{1}{16}$) ($X2 \frac{1}{4}$).

El segundo flujo de aire (vector azul) continua su trayectoria ascendente formado un arco helicoidal, sobre los ejes ($Y2 \frac{1}{4}$) ($X \frac{1}{4}$). Esto generado por la colisión del flujo de aire tres (vector rojo).

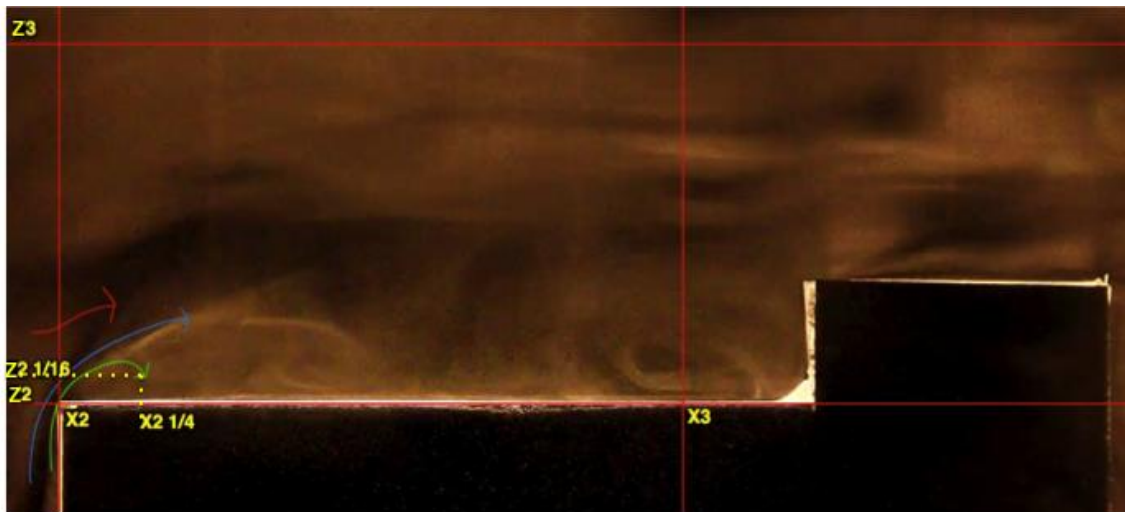


Figura 69 Flujo de aire con trayectoria descendente en la región 2 del modelo A.

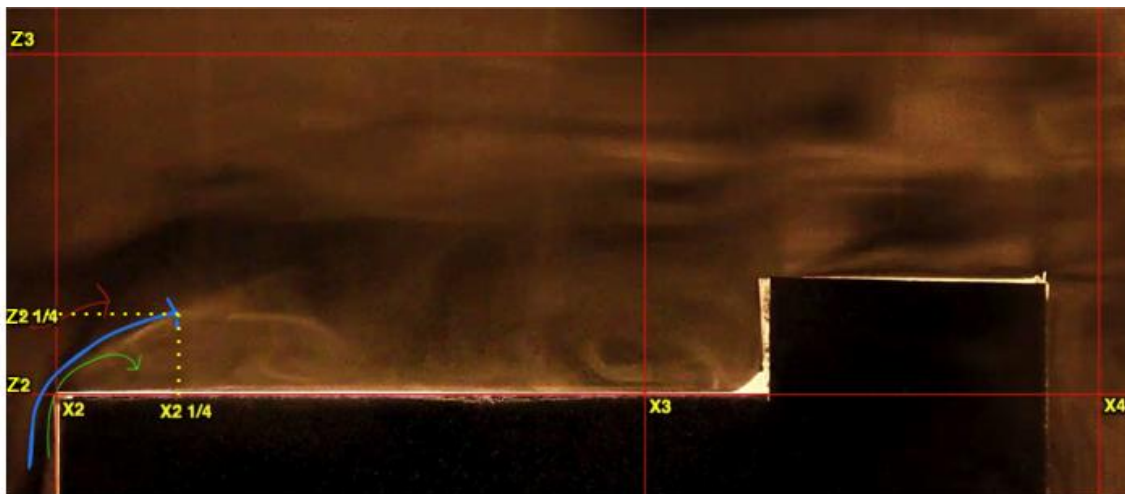


Figura 70 Flujo de aire con formación helicoidal en zona 2 del modelo A.

El flujo de aire uno(vector verde), continua con un movimiento descendente en el sentido de las manecillas del reloj, hasta colisionar con la base que en este caso

es la cubierta del modelo A. Sobre los ejes ($X_2 \frac{1}{4}$) (Y_2) de esta manera inicia la formación del vórtice que denominaremos D.

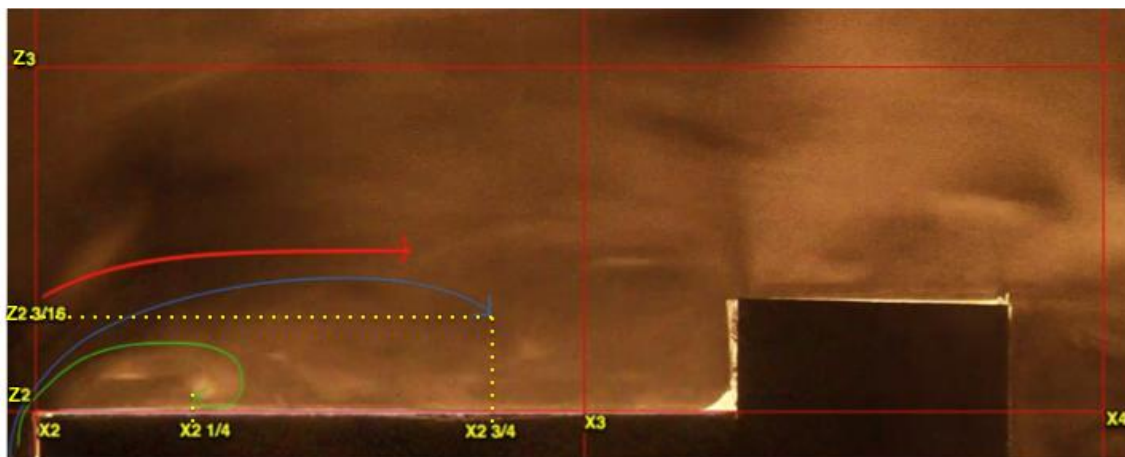


Figura 71 Flujo helicoidal o formación del vórtice D del modelo A.

En la Figura 71 se observa el flujo dos indicado con el vector azul, descendiende de forma helicoidal, sobre los ejes ($Y_2 \frac{3}{16}$) ($X_2 \frac{3}{4}$) y continua descendiendo en el sentido de las manecillas del reloj.

El flujo de aire formado por el vórtice D, colisiona con un estancamiento de aire ubicado en el eje ($X_2 \frac{1}{2}$) (vector amarillo), y continua el desplazamiento sobre el mismo, hasta colisionar e interceptarse con el flujo dos (vector azul), representado por el vórtice E.

El flujo de aire dos (vector azul), inicia la formación del vórtice E, este flujo desarrolla un movimiento descendente e helicoidal, sobre los ejes ($X_3 \frac{1}{16}$) ($Y_2 \frac{1}{2}$) hasta colisionar con la cubierta del modelo A. Y posteriormente intercepta con el vórtice D.

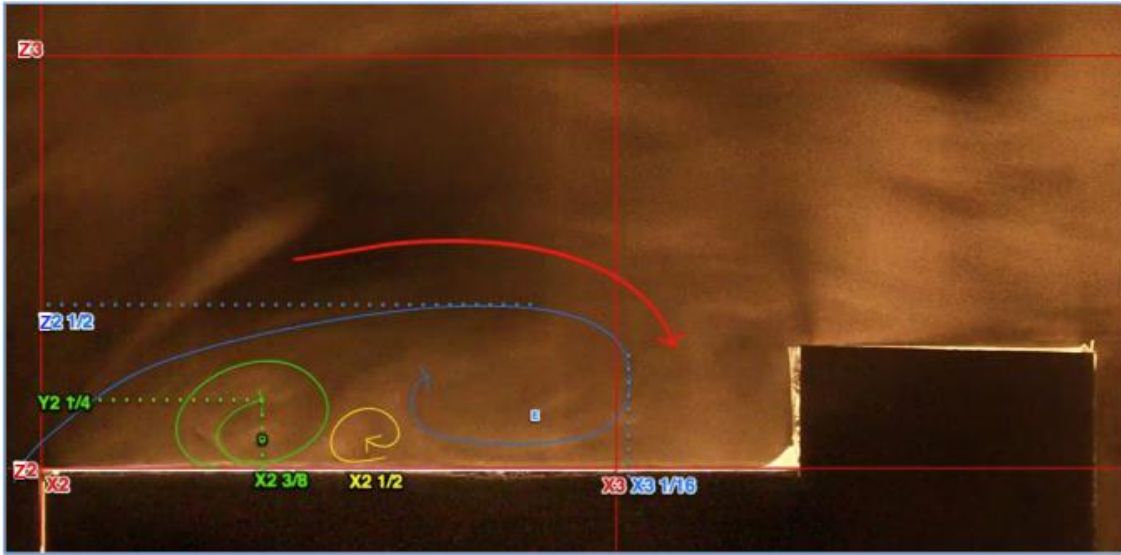


Figura 72 Trayecto del flujo D sobre el estancamiento del modelo A.

En la Figura 73 se observa la formación del vórtice E, se observa también un movimiento en retroceso, este movimiento se desarrolla, cuando el flujo de aire tres (vector rojo) empuja el flujo dos o vórtice E(vector azul), mismo que fluye con un movimiento helicoidal e inverso a la dirección del flujo que ingresa por la campana del túnel aerodinámico, este flujo, al avanzar, va cerrando la helicoidal observándose un movimiento en espiral, el cual, se fusiona con el vórtice D.

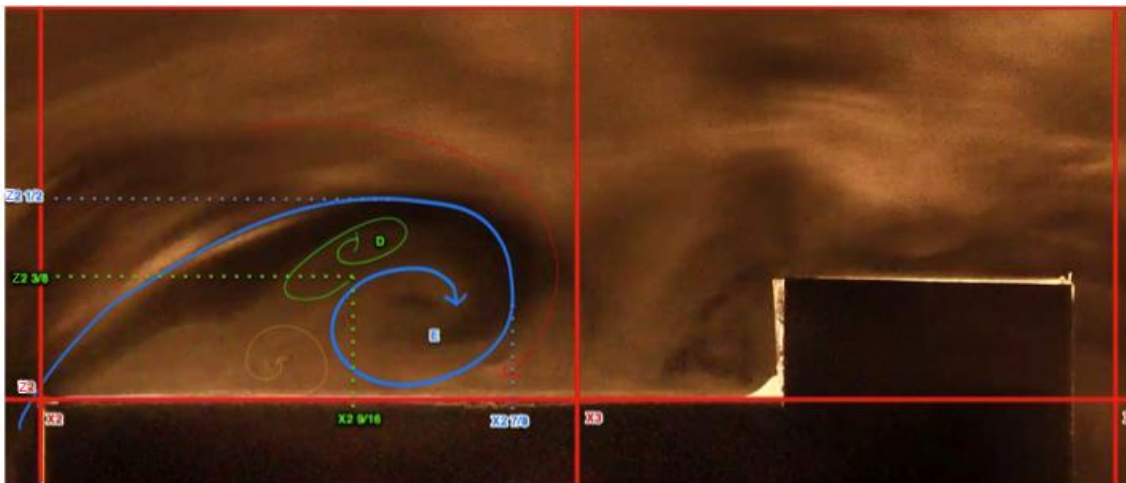


Figura 73 Unión de los vórtices D y E del modelo A.

El flujo del vórtice E continua con la trayectoria, la cual, presenta un movimiento en espiral este fluye Horizontalmente sobre los ejes ($Y2 \frac{1}{16}$) (X3), rebasando estancamientos de aire.

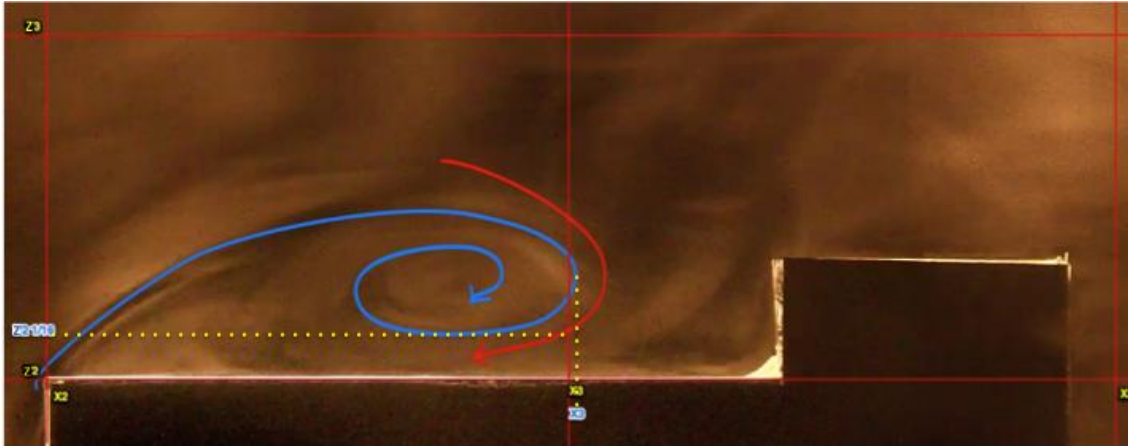


Figura 74 Flujo en espiral horizontal del vórtice E del modelo A.

En la Figura 75 se muestra el movimiento de aire E , Colinosa con un nueva línea de flujo o formación de aire F, sobre los ejes ($Y2 \frac{1}{2}$) y (X3), al colisionar el flujo E con F, el flujo E, empuja la formación de aire F, ascendiendo helicoidalmente sobre los ejes ($Y2 \frac{7}{8}$) ($X3 \frac{1}{4}$).



Figura 75 Colisión del Flujo E con formación F del modelo A.

Posteriormente el flujo F, en la Figura 76 continua con un movimiento helicoidal rebasando estancamientos de aire, sobre los ejes ($X3 \frac{1}{4}$) ($Y2 \frac{1}{16}$), el flujo, al paso de los estancamientos asciende y continua su trayecto en horizontal.

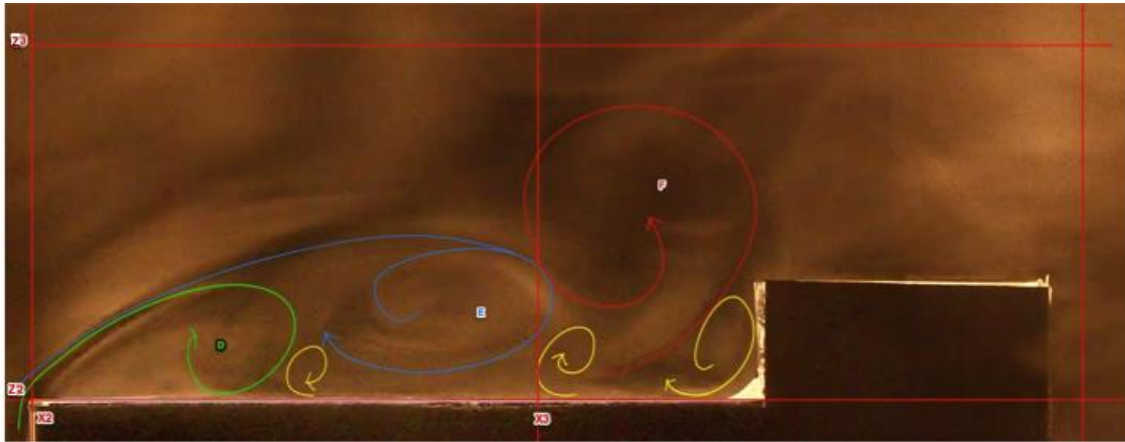


Figura 76 Flujo F rebasando estancamientos de aire del modelo A.

El flujo F, al continuar con su desplazamiento horizontal, ascendente colisiona con el cubo de las escaleras sobre los ejes (Y2 3/8) (X3 7/16)

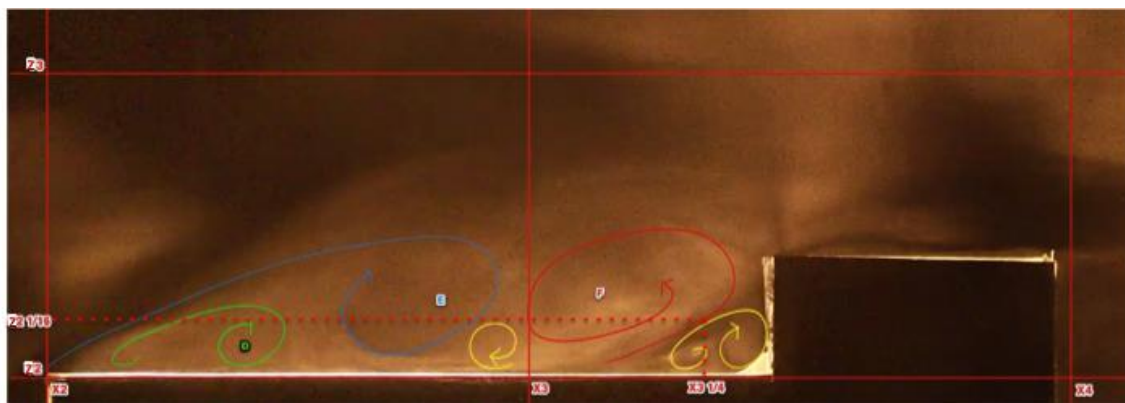


Figura 77 Trayectoria de la corriente de aire (F) del modelo A.

Análisis de la región 3 volumen A.

Antes de desarrollar el análisis de la región 3, es preciso aclarar que la visualización de la interacción del flujo del aire en la envolvente arquitectónica (A), cambiara a un ángulo de 90° o una perspectiva aérea, por ende se modificara el punto de referencia, al centroide de la fachada principal. Así como a su vez la geometría se dividirá en dos regiones de observación.

Para una simplificación del análisis se divide la geometría en dos regiones de observación (A) y (B), con el fin que de documentar paso a paso, el

desplazamiento y trayectoria del flujo, el cual, previamente colisiono con la fachada principal y dividió su trayectoria en movimientos ascendente, decente, izquierda y derecha, previamente se describieron los dos primeros movimientos (ascendente y descendente),

A continuación se describe el trayecto del flujo sobre las regiones (A) y (B) bajo una desplazamiento de continuidad de izquierda y derecha, el cual, interactúan con la fachada posterior derecha e izquierda paralelamente.

Cabe aclarar, que las referencias de descripción del flujo son ejes horizontales, los cuales denominamos ejes (A, A1, A1 ½... A4), y en vertical continuaremos con los (X, X1....X7). Así como también el orden de la descripción inicia con la región (B) ya que el flujo es casi simétrico en ambas regiones, lo cual el orden no afecta en la descripción en estas regiones.

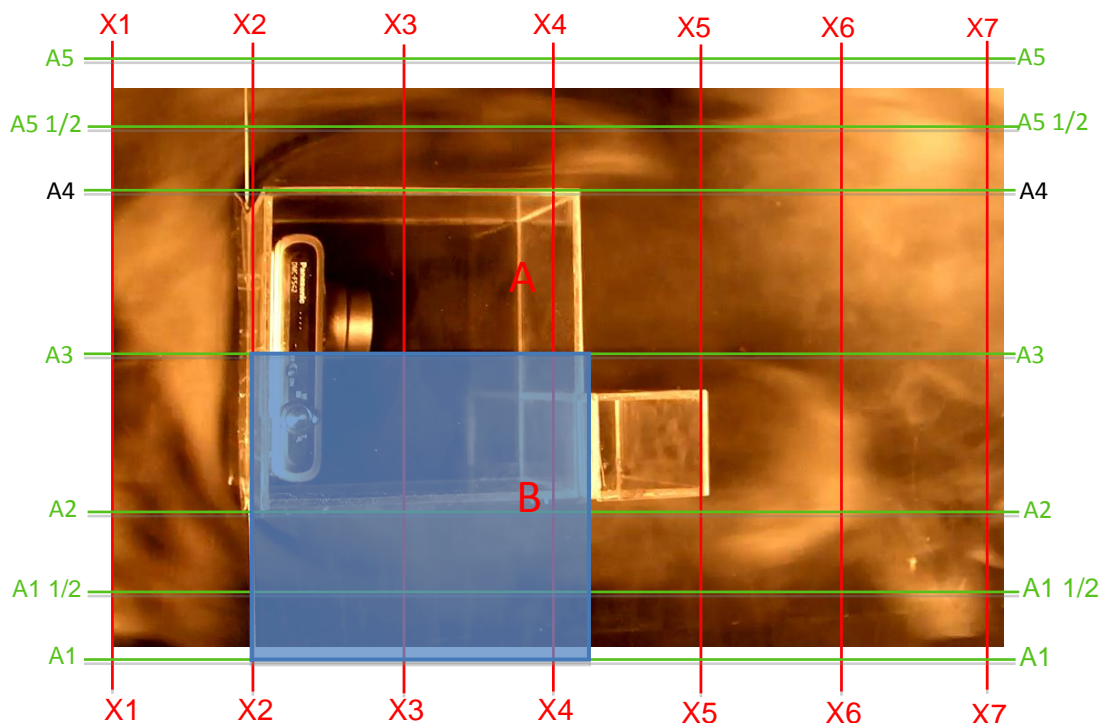


Figura 78 Región (B) vista aérea en ángulo 90° del modelo A.

El flujo posteriormente de interactuar sobre la fachada principal, como se menciona anteriormente se divide y continúa su desplazamiento paralelamente en horizontal sobre las fachadas posteriores izquierda y derecha de la geometría,

sobre las regiones (A) y (B), por lo que a continuación describiremos la interacción del flujo en la región (B) o fachada lateral izquierda.

El flujo que continua su trayectoria sobre la región (B) posteriormente de incidir sobre la fachada principal, se desplaza con un recorrido paraboloide, en esta trayectoria se observan dos líneas de flujo, para facilitar la interpretación se graficaran con vectores azul y naranja.

En la Figura 79 se observa que el flujo presenta una trayectoria paraboloide, la cual, se representa con el vector naranja, este flujo desde los ejes ($A1 \frac{7}{8} - X2$) se desplaza en parábola sobre los ejes hasta ($A1 \frac{3}{4} - X3$) sobre el, se observa otro paralelo, que se representara con un vector azul, mismo que desarrolla un movimiento paraboloide sobre los ejes ($A2 \frac{3}{8} - X1 \frac{1}{4}$) al continuar su desplazamiento, se abre en parábola en los ejes ($A1 \frac{5}{8} - X2 \frac{3}{8}$).

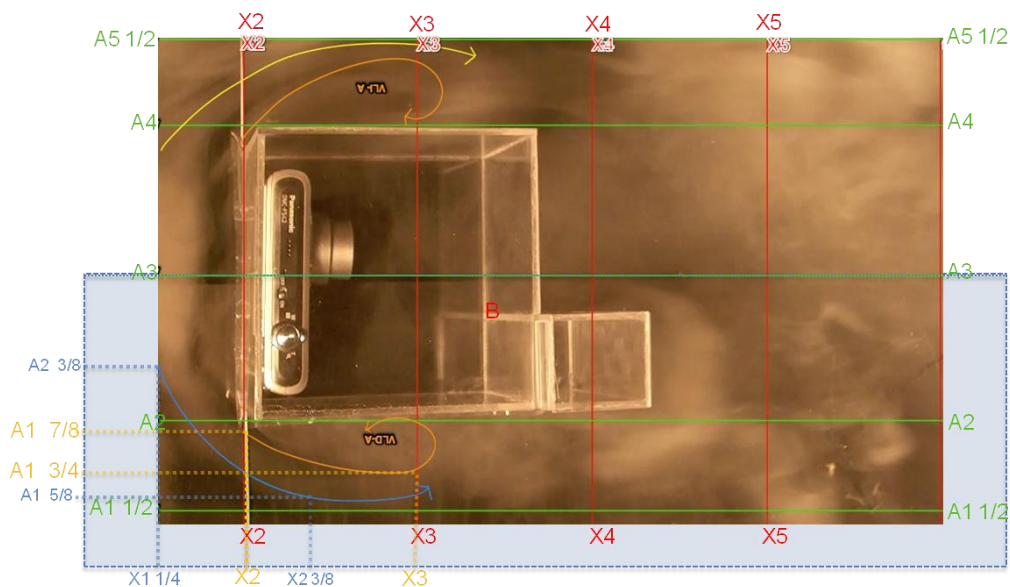


Figura 79 Trayectoria de flujo sobre la región (B) del modelo A.

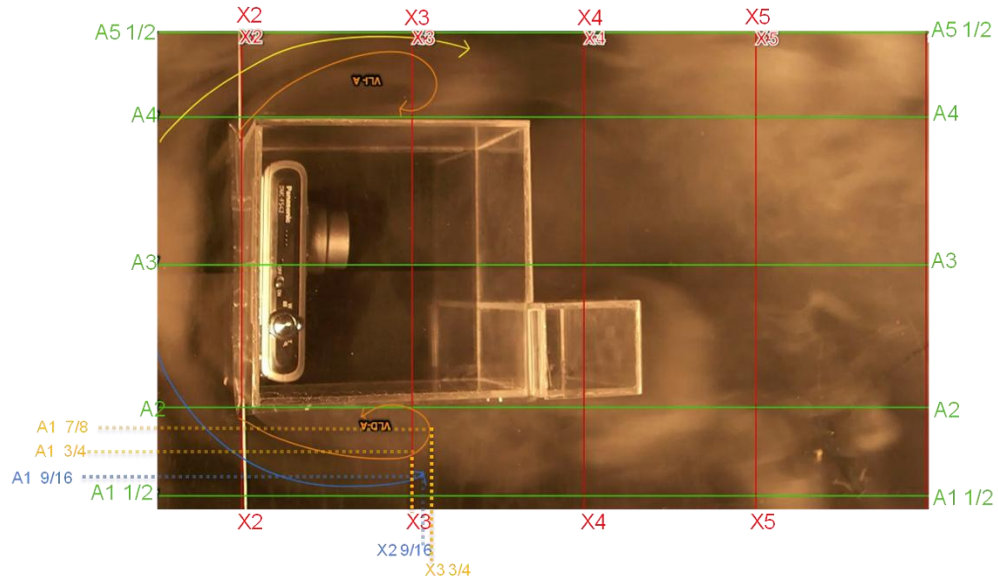


Figura 80 Formación del vórtice (G) del modelo A.

A partir de los ejes ($A1 \frac{3}{4}$ - $x3$) la línea de flujo (vector naranja) desarrolla un movimiento de giro contrario a las manecillas del reloj, cerrándose helicoidalmente en los ejes ($A1 \frac{7}{8}$ - $X3 \frac{3}{4}$) en este punto se observa como inicia la formación de un vórtice, en este caso lo denominaremos vórtice (G)

En la La línea de flujo uno o (vórtice naranja) continúa con su trayectoria helicoidal, contrario a las manecillas del reloj o la línea de flujo inicial, sobre los ejes ($A2 - X3$) colisiona con la fachada lateral derecha y nuevamente cambia la línea de trayectoria.

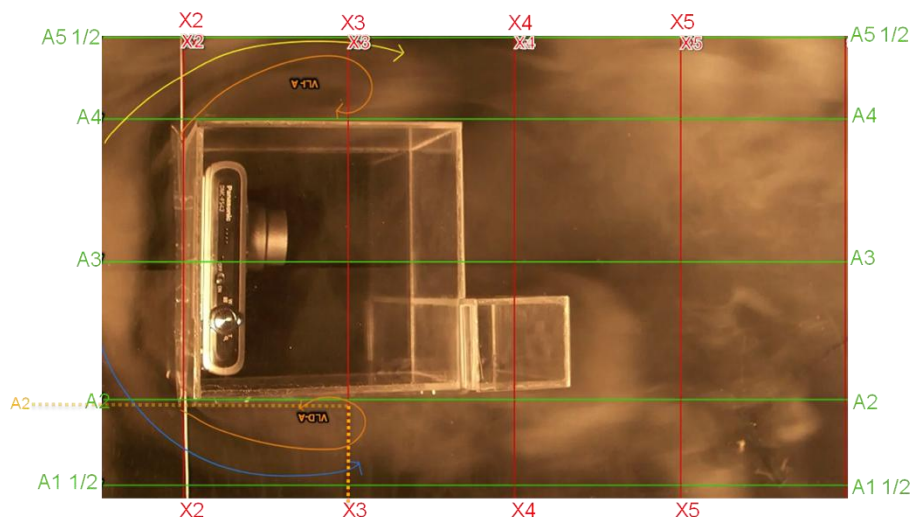


Figura 81 Formación del vórtice (G) en la región (B) del modelo A.

En la Figura 82 se observa que la segunda línea de flujo (vector azul) continua con el desplazamiento en parábola sobre la formación del vórtice (G) alejándose gradualmente acorde a la trayectoria del flujo de la fachada lateral izquierda.

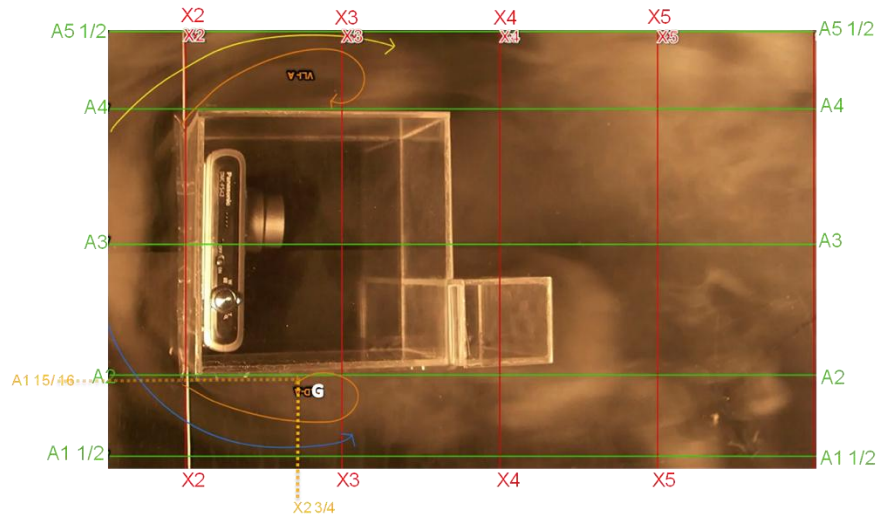


Figura 82 Vórtice (G) completamente desarrollado del modelo A.

La trayectoria de La línea de flujo uno (vórtice naranja) es de izquierda a derecha contraria a las manecillas del reloj, cerrando la helicoidal hasta formar el vórtice (G). Ver Figura 82.

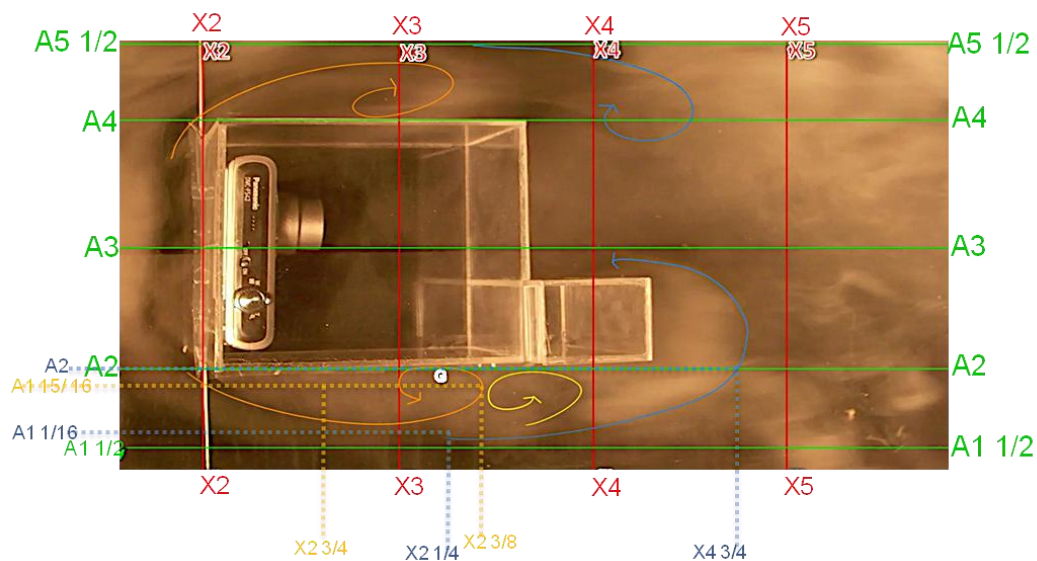


Figura 83 Desplazamiento del vórtice (G) del modelo A.

El vórtice (G) vector naranja desarrolla un movimiento helicoidal en forma de espiral sobre los ejes ($X2 \frac{3}{4}$) hasta ($X2 \frac{3}{8}$). Paralelo al vórtice (G) y sobre este, se observa el flujo dos (vector azul) que empuja el vórtice (G) para que este se desplace en horizontal y continua con una trayectoria paraboloide sobre los ejes ($A1 \frac{1}{16} - X2 \frac{1}{4}$) hasta los ejes ($A2 - X4 \frac{3}{4}$). En la Figura 83 se observa un estancamiento de aire que se representa con un vector de color amarillo, sobre le cubo de las escaleras o ejes ($X2 \frac{1}{2}$).

En la Figura 84 el vórtice (G) completamente desarrollado se desplaza horizontalmente en forma de espiral sobre los ejes ($X2, X3$) y en el punto ($A1 \frac{7}{8} - X3 \frac{5}{8}$) se observa como colisiona con un estancamiento de aire (vector amarillo) la trayectoria del vórtice no se ve truncada y continua su desplazamiento sobre el estancamiento de aire.

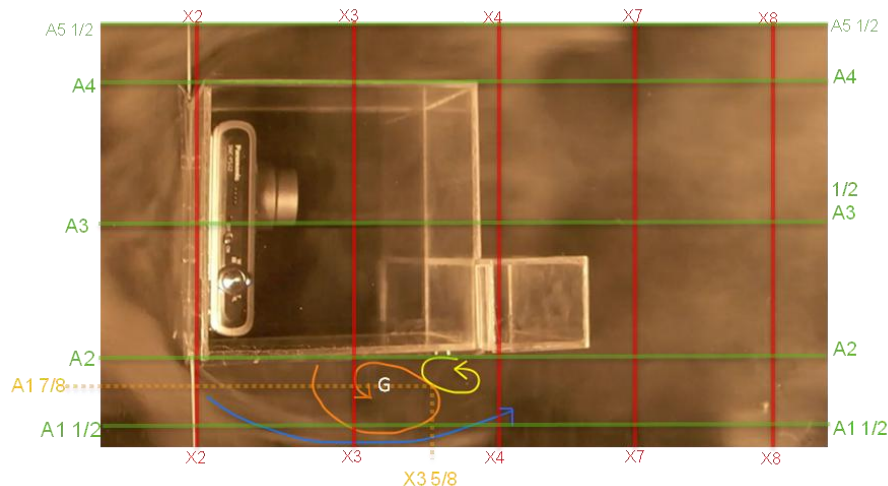


Figura 84 Colisión vórtice (G) con un estancamiento de aire del modelo A.

Al desplazarse el vórtice (G) sobre los ejes ($X3 \frac{5}{8} - A1 \frac{7}{8}$) se observa como en el trayecto de los eje ($X4 \frac{3}{8}$), se fusiona con el estancamiento de aire y continua su desplazamiento sobre el muro perimetral la fachada lateral izquierda en helicoidal. Ver Figura 85

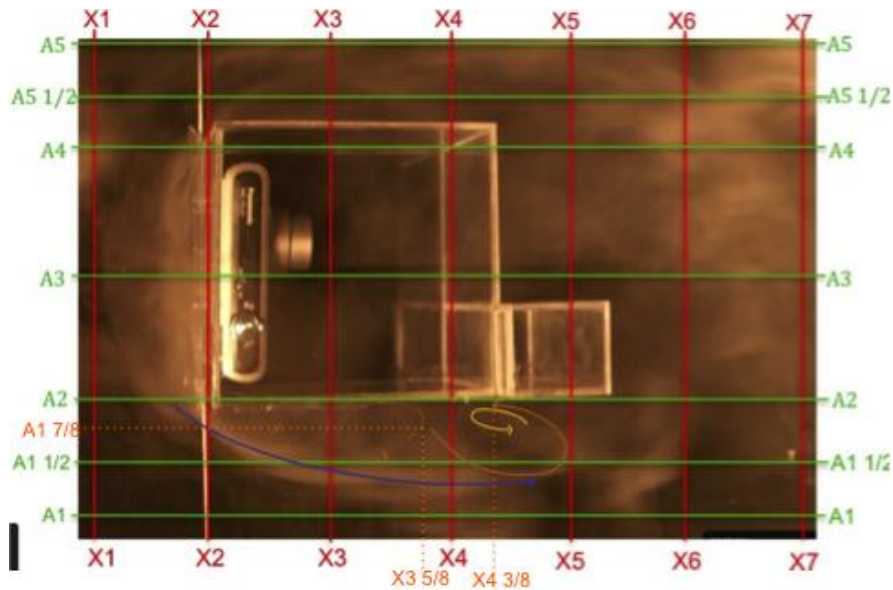


Figura 85 Unión del vórtice (G) con estancamiento de aire del modelo A.

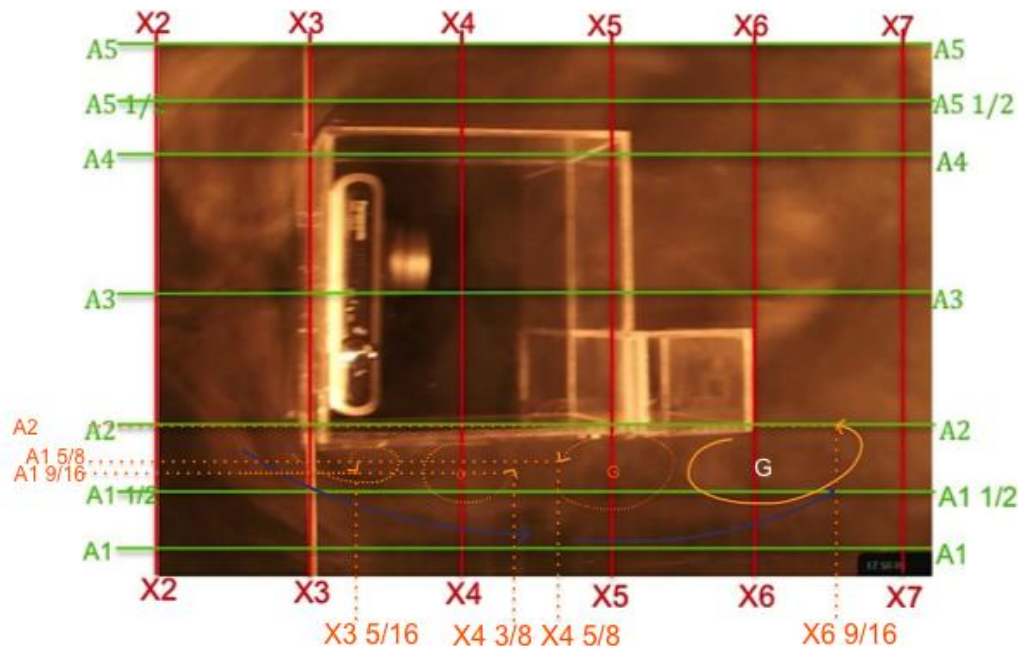


Figura 86 Desplazamiento del vórtice sobre la región B del modelo A.

El vórtice (G) se desarrollo y se desplazo completamente horizontal sobre el muro perimetral de la fachada posterior izquierda, en el punto (X6 9/16 – A2) el vórtice (G) o línea de flujo, cambio la trayectoria hacia la derecha e iniciando la formación del camino von Kármán. En la Figura 86 también se puede observa el desplazamiento completo del vórtice (G) sobre la región B, el vector naranja que

representa a el vórtice (G) se punteo para destacar los movimiento que el flujo uno desarrollo durante el trayecto.

Análisis de la región A.

En la Figura 86, la región (A) la comprende la fachada lateral derecha sobre los ejes (A5- X2,X3,X4..X7) en esta región se observa que el flujo desarrollo una deflexión hacia la derecha en referencia a la fachada principal, es decir, que el desplazamiento del flujo cambio la trayectoria hacia la derecha y posteriormente interactuar sobre la fachada lateral izquierda.

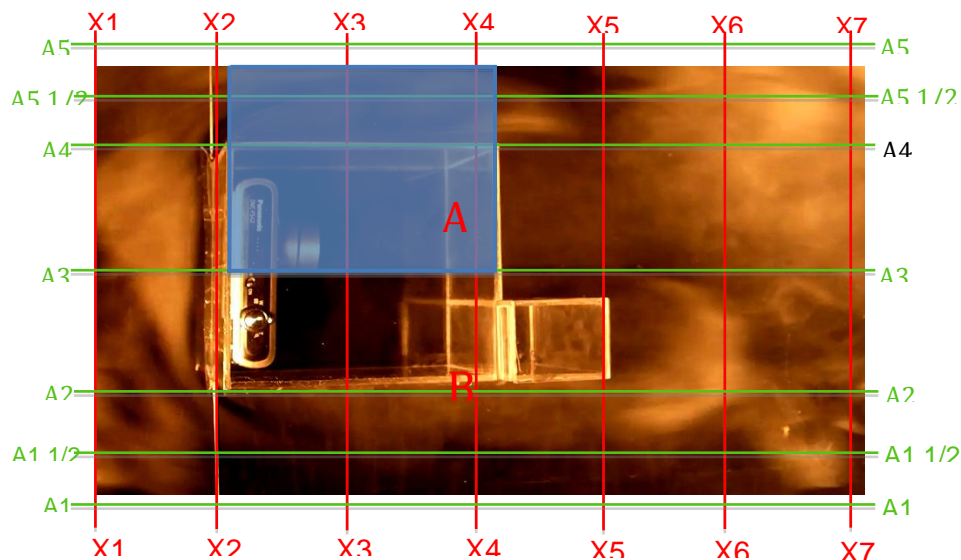


Figura 87 Región de análisis de la región B del modelo A.

En la región (A) observamos dos líneas de flujo que denominaremos línea tres y se representa con un vector de color naranja y la línea de flujo cuatro con un color de vector amarillo.

El flujo tres (vector naranja) se observa que se desplaza con una trayectoria parabólica sobre los ejes (X2 – A4) y (X3 – A4 7/8) este se aproxima, al plano de la fachada, sobre este flujo, se desplaza el flujo cuatro (vector amarillo) con un movimiento también en parábola, mismo que se aleja de la fachada lateral derecha y empuja el flujo tres.

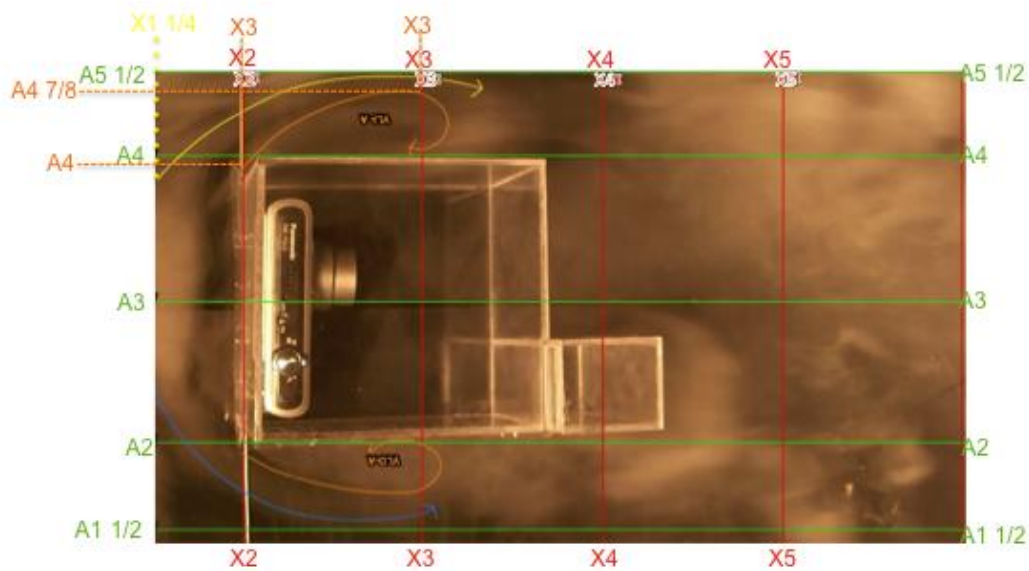


Figura 88 Trayectoria del flujo en la región A del modelo A.

Como se muestra en la Figura 89, el flujo tres(vector naranja) sobre los ejes (X3 – A4 7/8) cambia la dirección con una trayectoria helicoidal hacia la derecha, contrario a el flujo inicial, es decir, en sentido de las manecillas del reloj ejes sobre los (X2 7/8 – A4) en este punto, se inicia la formación del vórtice, el cual, denominaremos vórtice (H).

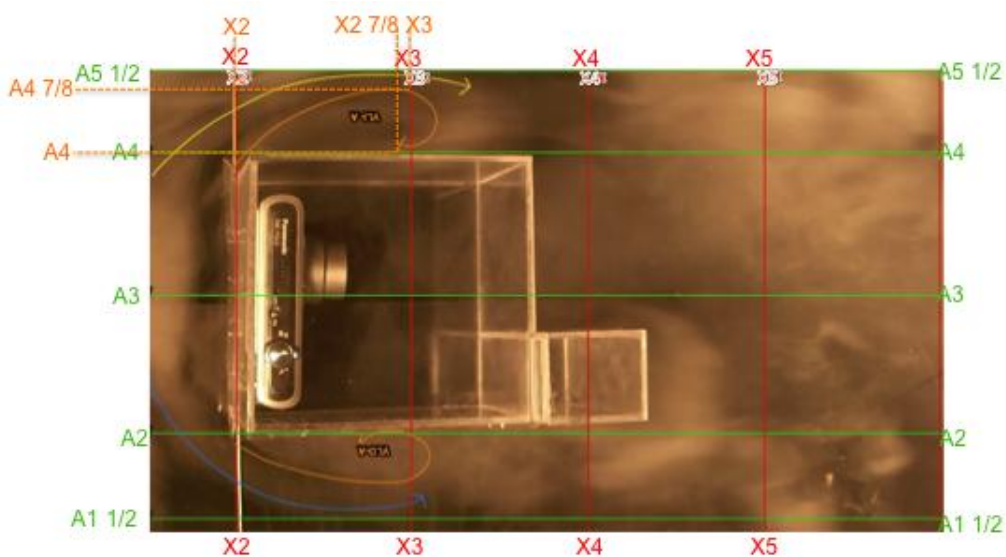


Figura 89 Formación del vórtice H del modelo A.

En la Figura 89, el flujo tres (vector naranja) cambia la dirección y colisiona con el muro perimetral de la fachada derecha, se observa que flujo presenta una trayectoria hacia la izquierda en el plano ($X2 \frac{7}{8} - A4 \frac{1}{4}$) desarrollando un movimiento en espiral que da inicio a la forma al vórtice (H).

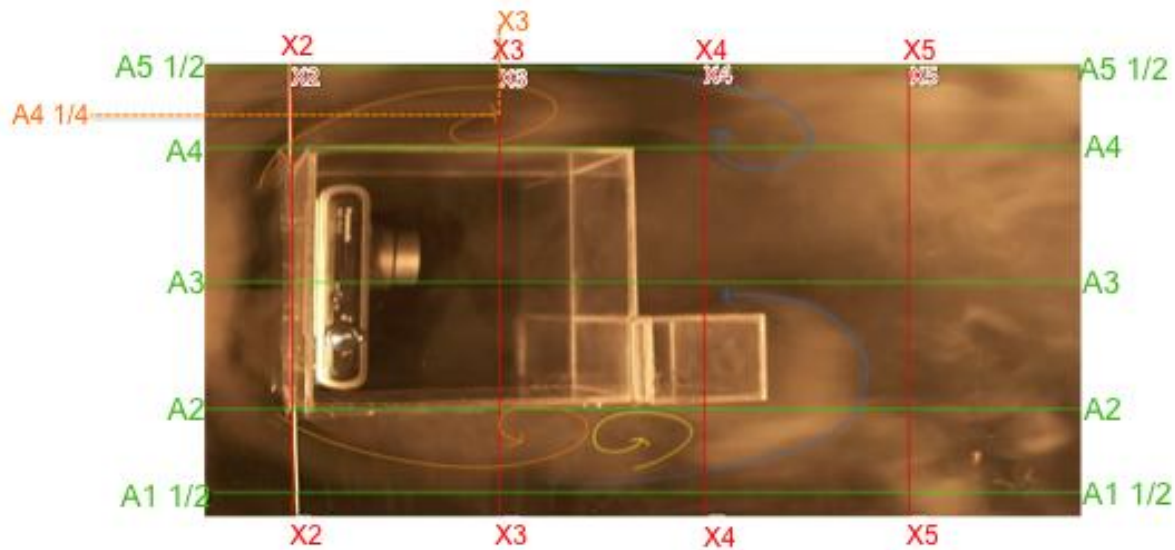


Figura 90 Desplazamiento del vórtice H del modelo A.

La línea de flujo tres representada con el vector naranja, se desplaza con un movimiento en espiral o vórtice (H) sobre el muro perimetral de la geometría a lo largo de los ejes ($A4 \frac{1}{4} - X3$). Ver Figura 90

En el punto ($X3 \frac{1}{8} - A4$) la naciente formación del vórtice (H), colisiona con un estancamiento de aire, mismo que se representara con un vector amarillo, dicha colisión no afecta el desplazamiento de aire, ya que este continua sobre el estancamiento.

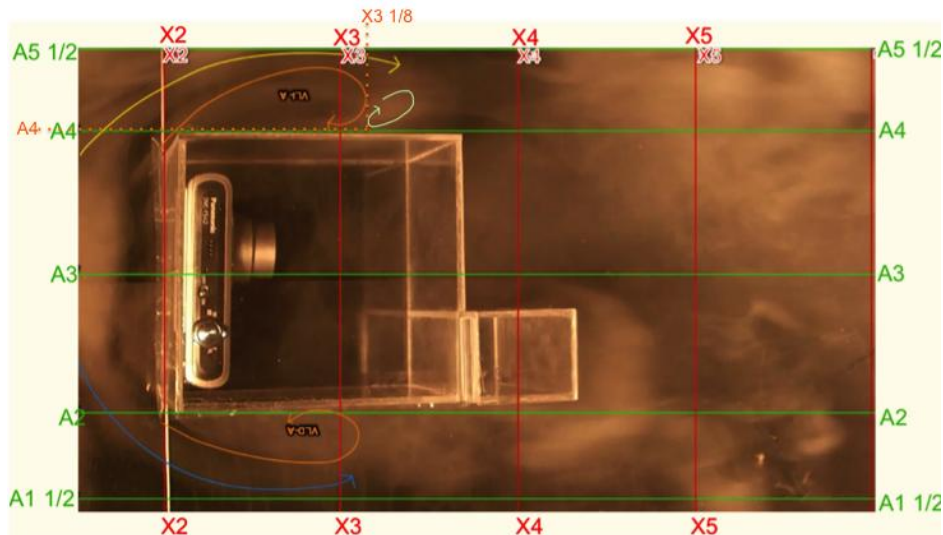


Figura 91 Colisión del vórtice (H) con el estancamiento de aire del modelo A.

En la Figura 92, el vórtice (H) continua con el desplazamiento en espiral, sobre los ejes ($X3 \frac{1}{4}$ - $A4 \frac{1}{16}$) en este punto pasa por encima del estancamiento de aire, en el trayecto horizontal del vórtice (H) este se va fusiona con el estancamiento.

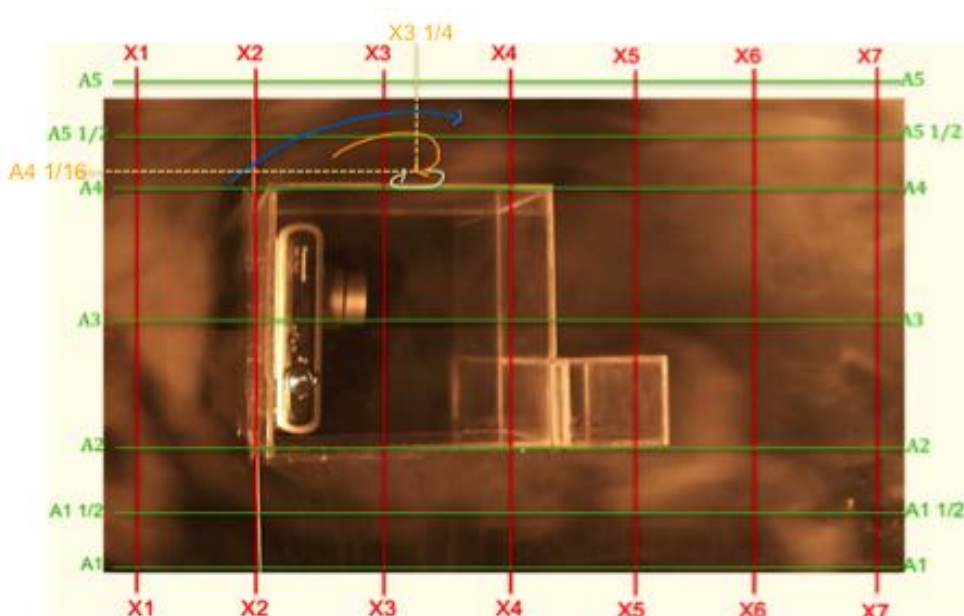


Figura 92 Fusión del vórtice (H) con el estancamiento del modelo A.

En el punto ($X3 \frac{5}{8}$ - $A4 \frac{7}{18}$) el vórtice (H) se ha fusionado por completo con el estancamiento de aire y continua con un desplazamiento helicoidal sobre el muro perimetral de la geometría.

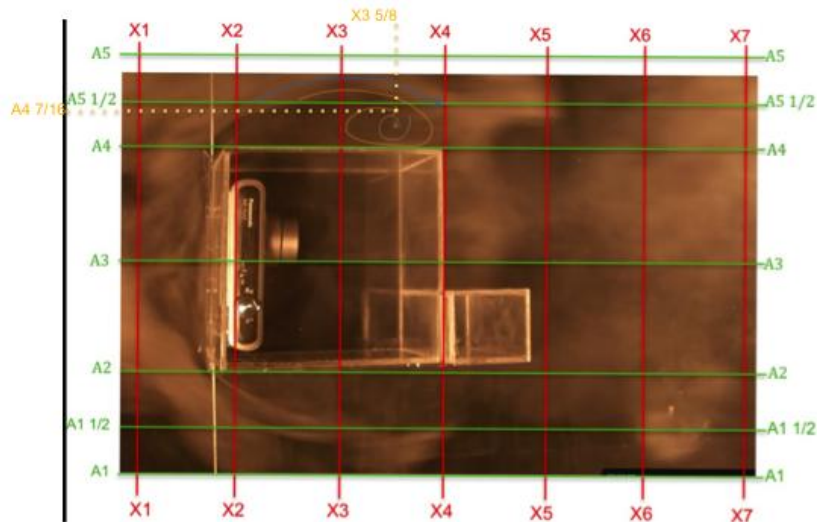


Figura 93 Vórtice (H) rebasando el límite de la región A.

La línea de flujo tres posteriormente de desarrollase por completo en un vórtice, es decir, el vórtice (H) continua una trayectoria helicoidal sobre los ejes ($X4 \frac{3}{8}$) este flujo en espiral se desplaza, y rebasa las líneas de parámetro de la región A. Ingresando a una nueva región de análisis, en el que entra hacer parte de un camino de vórtices que lleva el nombre del investigador que los dio a conocer von Kármán, los cuales, se describirá en el siguiente inciso. En la Figura 94 se puede observar la trayectoria y formación del vórtice, para ellos se puntuaron los vectores que conforman las etapas de formación y trayectoria del vórtice (H).

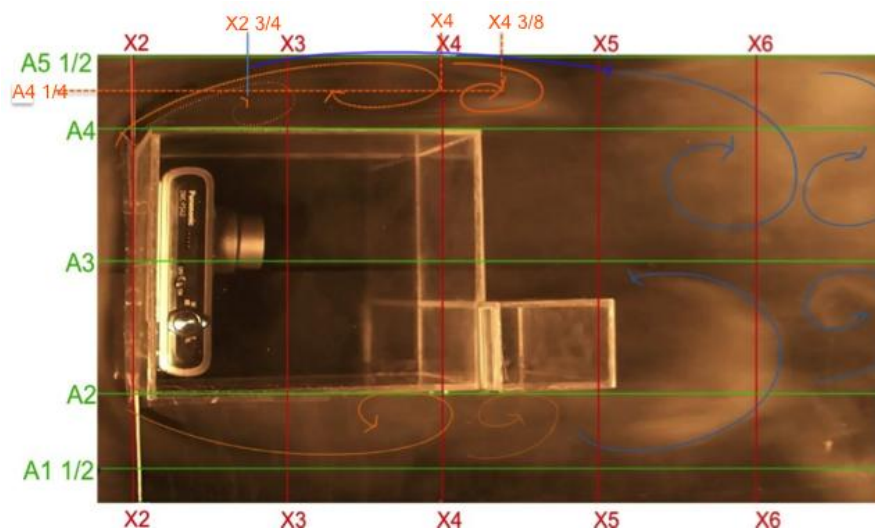


Figura 94 Desplazamiento del vórtice sobre la región A.

ANÁLISIS DE LA REGIÓN 3 DEL VOLUMEN A

La región 3, la comprende la sección opuesta a la trayectoria del flujo, es decir, en barlovento, inicia a partir del eje (X4, X5, X6...) en esta región convergen los vórtices y formaciones helicoidales que interactuaron sobre la geometría arquitectónica.

Es en esta región donde las formaciones de vórtices continúan con un desplazamiento paralelo entre sí, los cuales, presentan un sentido de giro diferente, es decir, que mientras uno gira en sentido de las manecillas del reloj, la formación paralela gira en sentido contrario, ambas formaciones se empujan entre sí, para continuar con su desplazamiento de esta manera se forman los caminos de vórtices de von Kármán. A continuación se describe la formación y trayectoria de los caminos de vórtices de von Kármán en una geometría arquitectónica.

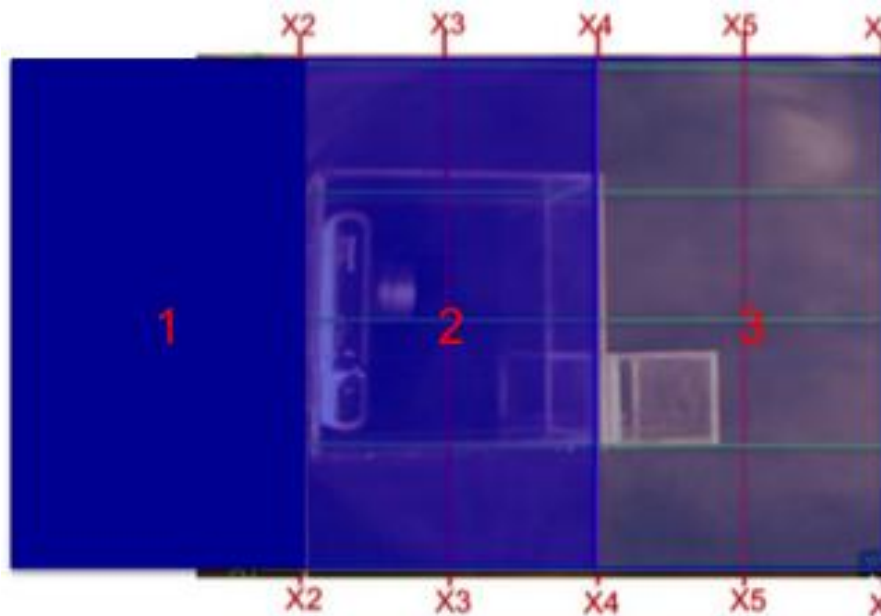


Figura 95 Región 3 del modelo A.

En la región 3, como se menciona anteriormente, se concentran las formaciones de vórtices que interactuaron sobre la geometría arquitectónica, entre ellos

podemos observar, los vórtices que se formaron en la región 2 (A y B), y continuaron con una trayectoria de derecha e izquierda y se encuentran en la región 3.

El flujo con una trayectoria hacia la derecha, es decir, la región 2A se observa que la línea de trayectoria o la formación del vórtice (H) sobre los ejes ($X5 \frac{11}{16} - A2 \frac{1}{2}$) se desplaza con giro helicoidal sobre el cubo de las escaleras, sobre este, trasciende un flujo con un movimiento parabólico en sentido contrario a las manecillas del reloj y con una mayor presión dinámica que forma un vórtice de mayor dimensión, por lo que vamos a referiremos al vórtice (I) y lo representaremos con un vector de color (azul oscuro), este se distingue sobre los ejes ($A2 \frac{1}{2} - X6 \frac{1}{4}$).

Así como también podemos visualizar el flujo que anteriormente presentaba una trayectoria izquierda en referencia al centroide de la geometría, el cual, interactúa sobre la región 2B y da forma a el vórtice (G) sobre los ejes ($A4 \frac{1}{4} - X4 \frac{11}{16}$), sobre él, se desplaza una nueva línea de flujo en el punto ($A2 \frac{1}{2} - X6 \frac{1}{4}$) con una trayectoria en parábola que posteriormente cambia a un movimiento en forma de espiral en sentido de las manecillas del reloj y nos referiremos a la formación del vórtice (J) y se representara con un vector de (color azul).

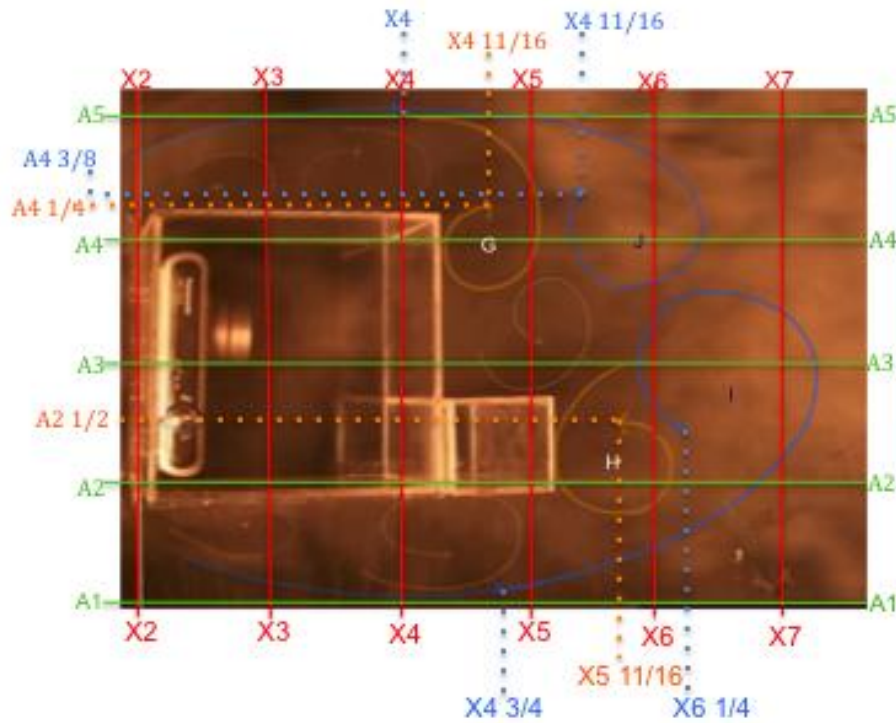


Figura 96 Convergencia de vórtices H y G del modelo A.

La trayectoria del vórtice (I) continua desde los ejes ($A2 \frac{1}{2}$ - $X6 \frac{1}{4}$) en forma de espiral en sentido contrario a las manecillas del reloj colisionando y fusionando por completo el vórtice (h) e incluso colisiona con el vórtice (J) impulsándose mutuamente para que continúen en una trayectoria horizontal paralelamente sobre los ejes ($A2 \frac{11}{6}$ – $X5 \frac{1}{2}$)

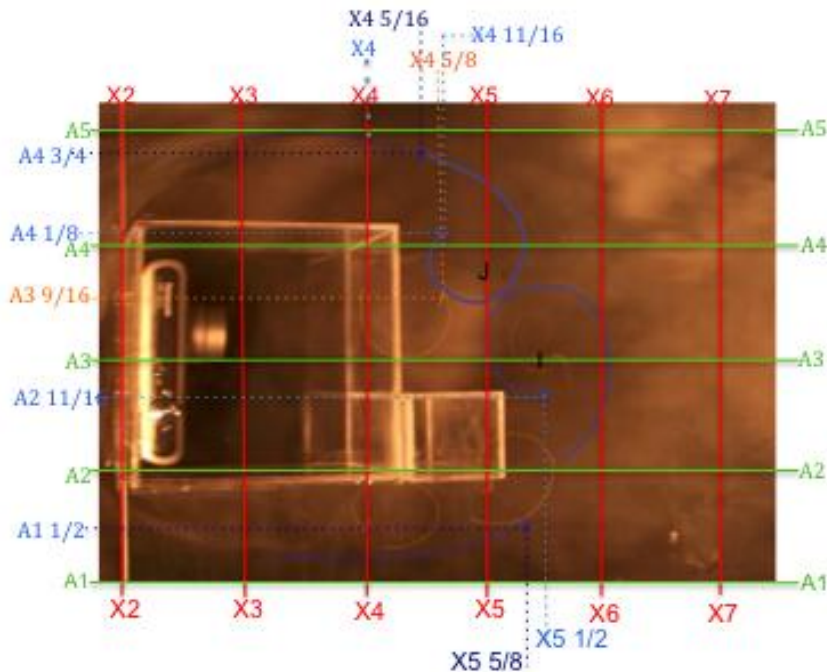


Figura 97 Origen del camino de vórtices de von Kármán en una envolvente arquitectónica del modelo A.

Con una trayectoria en helicoidal se desplaza el vórtice (J) sobre los ejes ($A4 \frac{3}{4}$ - $X4 \frac{3}{4}$) continua con un movimiento en sentido de las manecillas del reloj, hasta colisiona con el vórtice (I) sin sobrellevar ningún cambio en su trayecto renovando su desplazamiento sobre los ejes ($A4 \frac{1}{8}$ – $X4 \frac{11}{16}$), la colisión es benéfica; ya que este empuja de izquierda a derecha, por ende, apoya en su desplazamiento horizontal a ambos vórtices, dando origen a los caminos de vórtices de von Kármán.

En el choque de las dos líneas de flujo, se observa que el vórtice (J) hace contacto y avanza sobre el vórtice (i) con una pequeña diferencia, este continuando con su desplazamiento en helicoidal sobre los ejes ($A3 \frac{11}{6}$ – $X5$).

Así como también se observa dos nuevas líneas de flujo, una sobre la región 2ª y la otra sobre la región 2B, cabe mencionar que para simplificar el análisis de la región 3, dichos flujos se definirán como la continuidad de los vórtices (H) y (G) y se representaran con vectores naranja.

El vórtice (H) colisiona y empuja el vórtice (J) sobre los ejes ($A4 \frac{1}{4} - X5 \frac{7}{6}$) apoyando el desplazamiento en horizontal de vórtice (J)

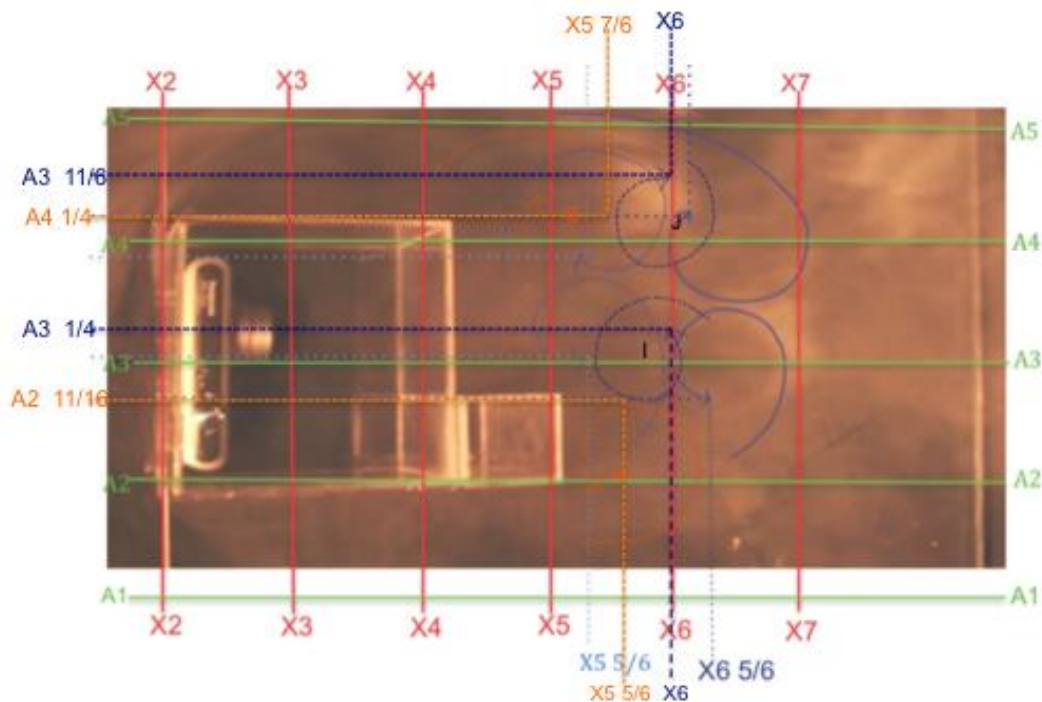


Figura 98 Interacción entre los vórtices J y L del modelo A.

Paralelo a el vórtice (J) el flujo (i) se desplaza con un movimiento en sentido de las manecillas del reloj, se observa como el vórtice (J) embiste y lo rebasa el vórtice (I), ya que en paralelo el vórtice (j) es apoyado por el vórtice (G) vector naranja dándole un empuje en horizontal. El vórtice (I) no se ve afectado en línea de trayectoria y continua su desplazamiento sobre los ejes ($A3 \frac{1}{4} - X6$).

Los vórtices (J) y (I) continúan con un desplazamiento en helicoidal paralelo en horizontal, Cabe recordar que el vórtice (J) en sentido de las manecillas del reloj y el vórtice (I) en sentido contrario a las manecillas.

La trayectoria del vórtice (J) en el punto ($A4 \frac{3}{6} - X6 \frac{1}{8}$) es casi simétrica a la del vórtice (I) ya que este se alinea con el vórtice (j) sobre los ejes ($A2 \frac{1}{4} - X6 \frac{5}{6}$) y continúan su desplazamiento sin rebasarse.

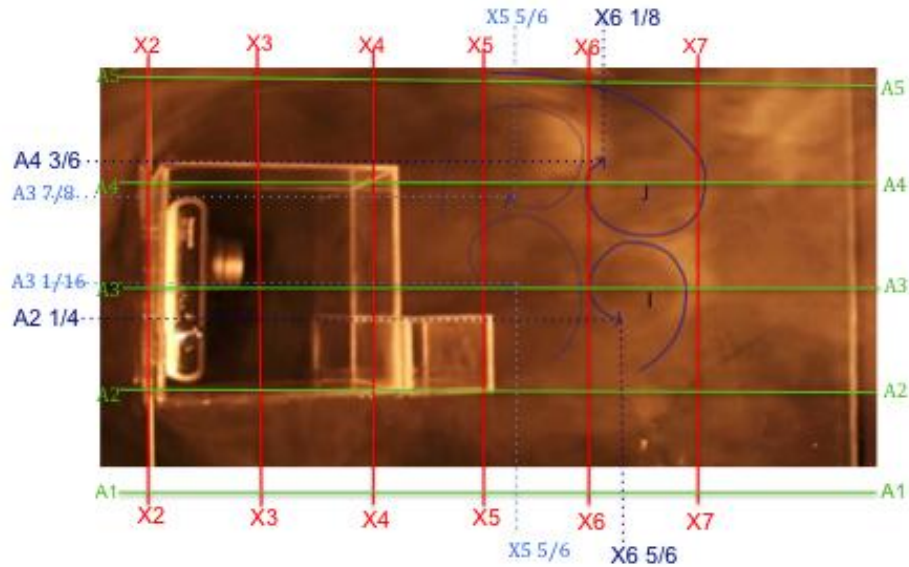


Figura 99 Alineamiento del vórtice J y I del modelo A.

El vórtice (J) desde el eje ($A4 \frac{3}{6} - X6 \frac{1}{8}$) se observa que presenta una leve deflexión hacia la derecha, y continua con un movimiento helicoidal sobrepasando a el vórtice (j) en el punto ($A3 \frac{7}{8} - X7 \frac{3}{6}$). Simultáneamente el vórtice (I) continua con el desplazamiento igual en helicoidal siguiendo la continuidad del vórtice (J).

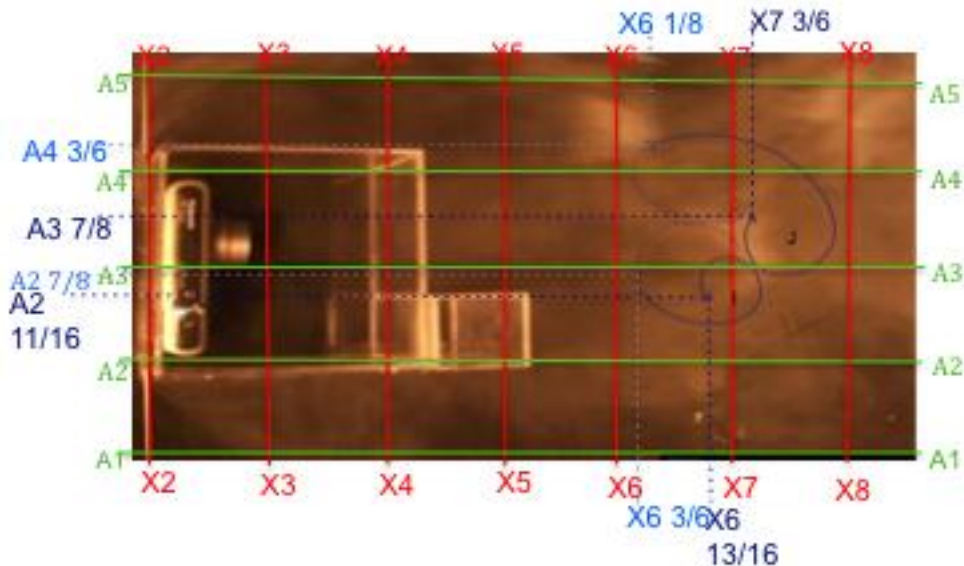


Figura 100 Sobrepaso del vórtice J al vórtice I del modelo A.

El trayecto de los vórtices continua sobre el plano de las X, es decir , horizontalmente se observa que nuevamente el vórtice (I) colisiona y sobrepasa el vórtice (J) para continuar su desplazamiento en sobre los ejes (A3 7/8 – X7 3/6). Por otro lado el vórtice (J) queda atrás siguiendo el vórtice (I), esto dos vórtices posteriormente se fusionan con líneas de flujo que no se alcanzan a capturar en el área de visualización del dispositivo de captura de imagen, dichos vórtices y líneas de flujo continúan con una trayectoria de flujo turbulento.

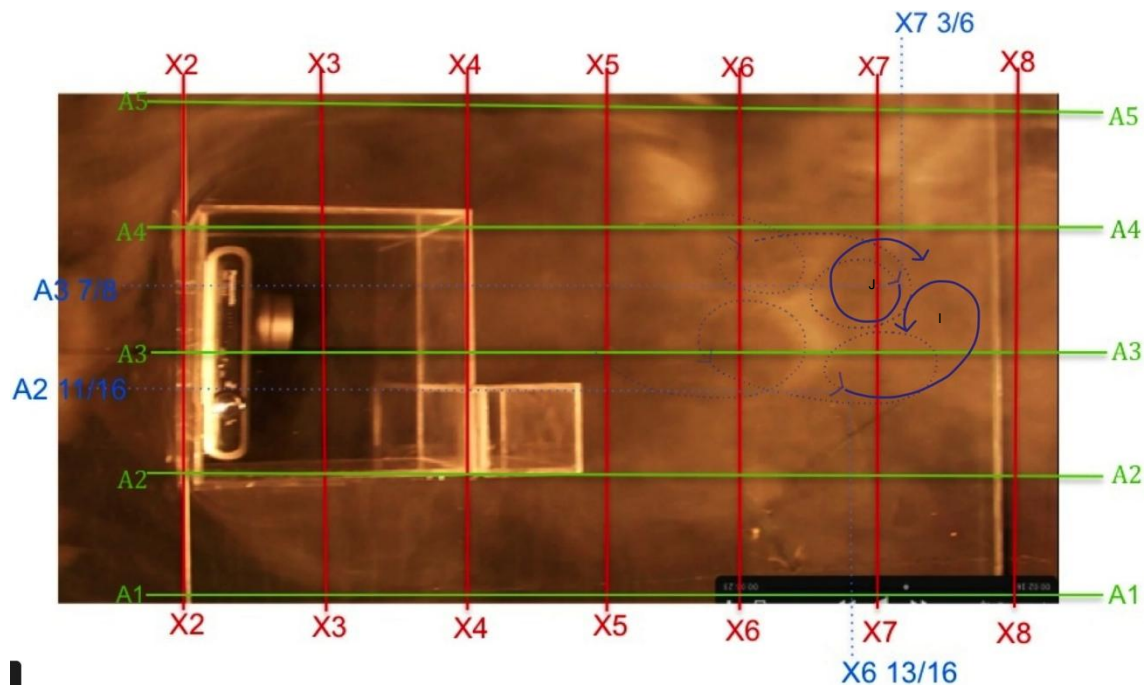


Figura 101 Evolución de los vórtices I y J del modelo A

4.3. CASO DE ESTUDIO B

Para el análisis de resultados, se parte de la región 1, esta zona se puede observar en la Figura 102, y así como el plano o eje 3 del modelo arquitectónico, que se plantea como referencia inicial.

El flujo del aire presenta un movimiento horizontal completamente desarrollado, sobre la base de la técnica de visualización, al ingresar a la región de análisis en eje (Y y X) su desplazamiento es uniforme, y se representa con vectores de color azul, se puede observar en la Figura 102

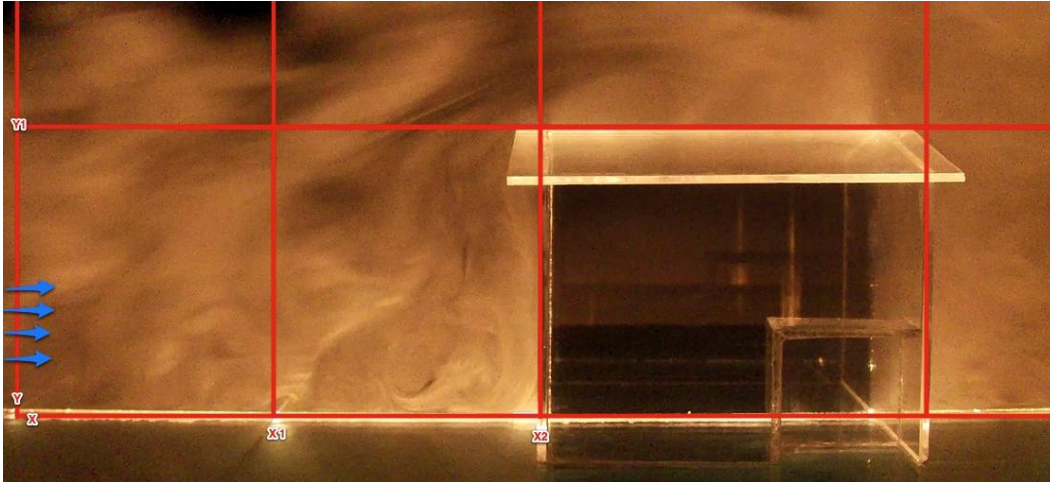


Figura 102 Flujo de aire en la región 1 del modelo B.

El flujo continua su desplazamiento horizontal, hasta el los ejes ($X \frac{3}{4}$) y ($Y \frac{1}{2}$), a partir de este punto, el cual, se indica en la Figura 103, con una línea amarilla. Este flujo presenta un movimiento descendente e inicia la formación de un vórtice que denominaremos vórtice A.

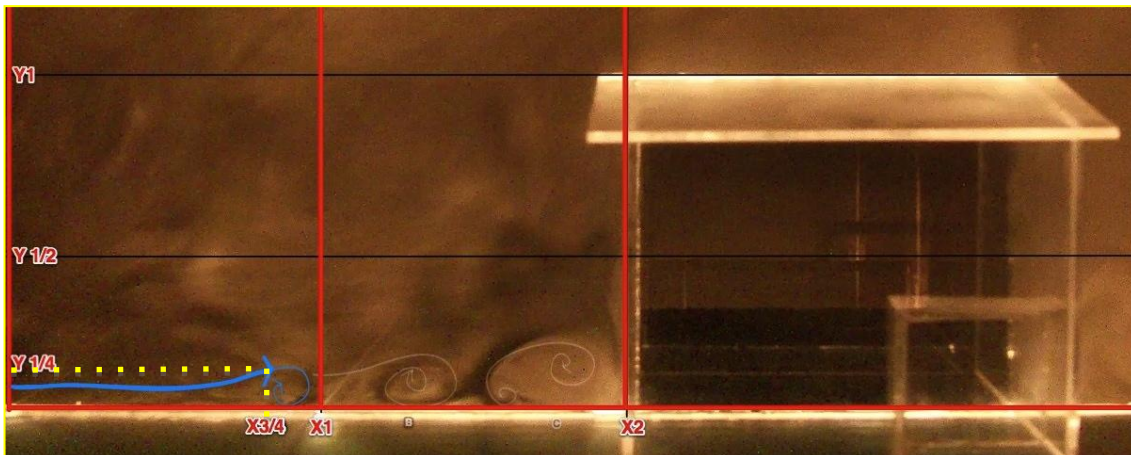


Figura 103 Flujo del aire sobre la región 1 del modelo B.

Posteriormente el flujo del aire, el cual, marcaremos con un vector de color azul, se desplaza descendientemente, sobre los ejes ($X \frac{15}{16}$) y ($Y \frac{1}{16}$) formando un arco elipsoidal en el sentido de las manecillas del reloj, el anterior movimiento se puede observar en la Figura 104.

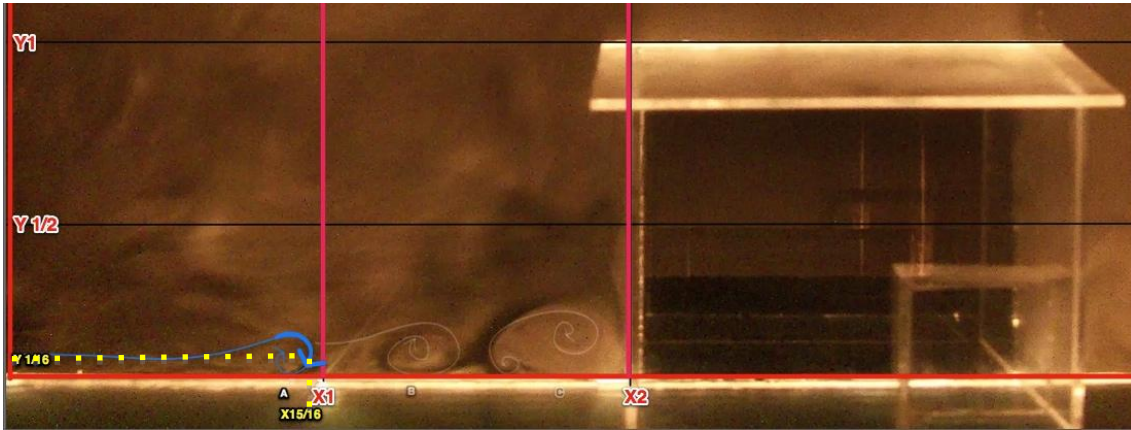


Figura 104 Movimiento descendente del flujo de aire del modelo B.

A partir de los ejes ($X_{15/16}$) y ($Y_{1/16}$) el flujo del aire continua con un movimiento descendente e inverso a las manecillas del reloj; ocasionado por el choque del flujo de aire con la base de la técnica experimental, complementando la elipse, la cual, se comprime gradualmente, al colisiona con un flujo superior en este caso, el choque se presenta con el flujo ($X_{3/4} - Y_{1/2}$), que se observa en la Figura 103. Este choque genera que el flujo continúe su movimiento en forma de espiral y de esta manera se forma el vórtice A.

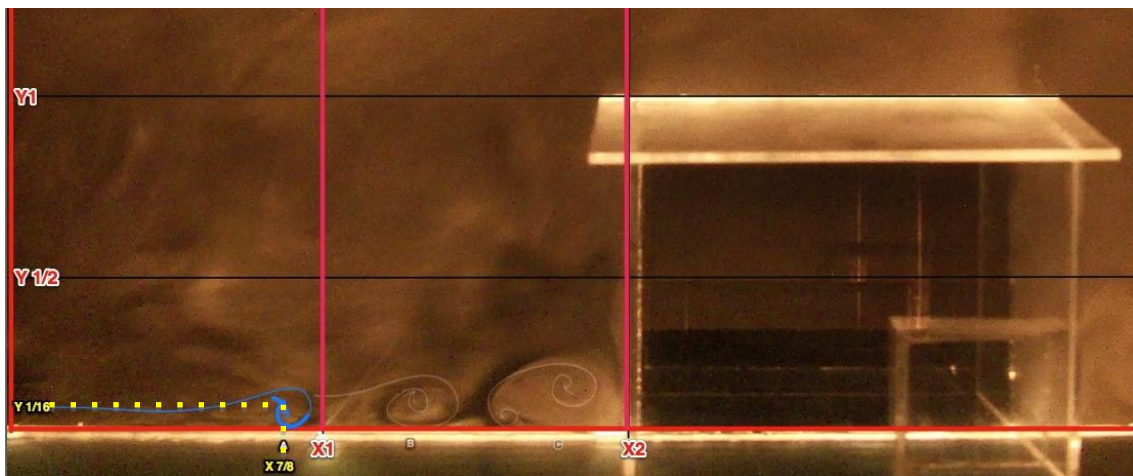


Figura 105 Formación del vórtice A del modelo B.

En la Figura 106 se muestra que el flujo del aire continua con un trayecto horizontal sobre el eje X_1 , en este desplazamiento, se observaron un movimientos ascendentes sobre el eje ($Y_{1/4}$) ($X_{1/4}$) (línea amarilla), generado por el escalonamiento del vórtice A y un flujo paralelo superior (vector azul oscuro).

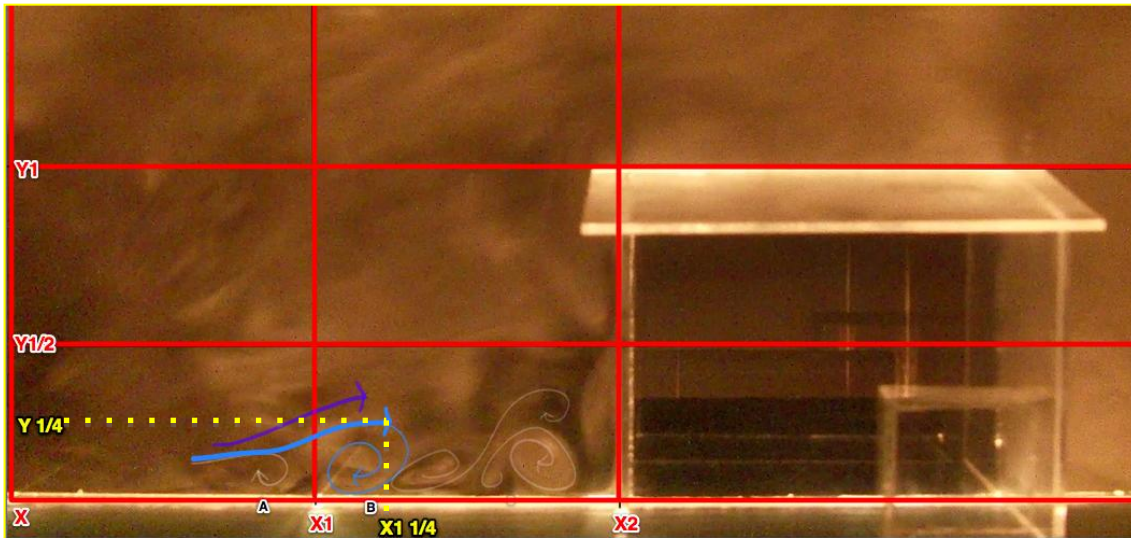


Figura 106 Movimiento ascendente sobre eje X1 del modelo B

Posteriormente el flujo de aire descende e inicia a formar un arco helicoidal sobre los ejes (Y 1/16) y (X1 5/16) (Línea amarillas), este movimiento se forma con respecto a las manecillas del reloj, y se puede observar en la .

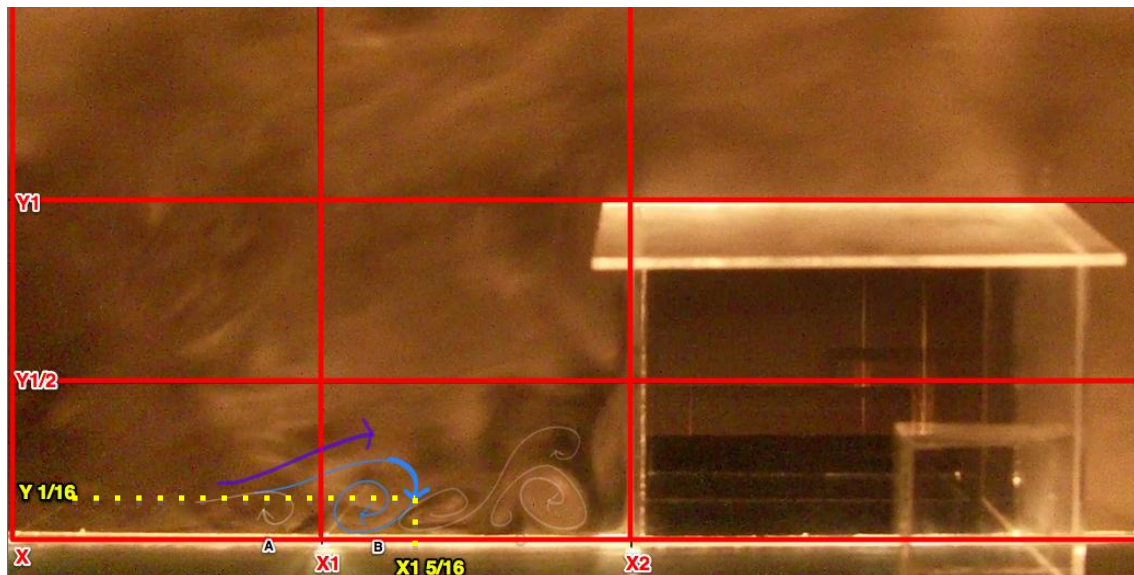


Figura 107 Movimiento descendente en X1 del modelo B

El flujo continua en descenso hasta colisionar con la base de la técnica experimental, comprimiendo el arco helicoidal y generando un movimiento ascendente sobre los ejes (Y 1/16) y (X1 1/16)(líneas amarillas), así mismo, el

arco helicoidal continua con la reducción progresiva generada por los choque de flujos.

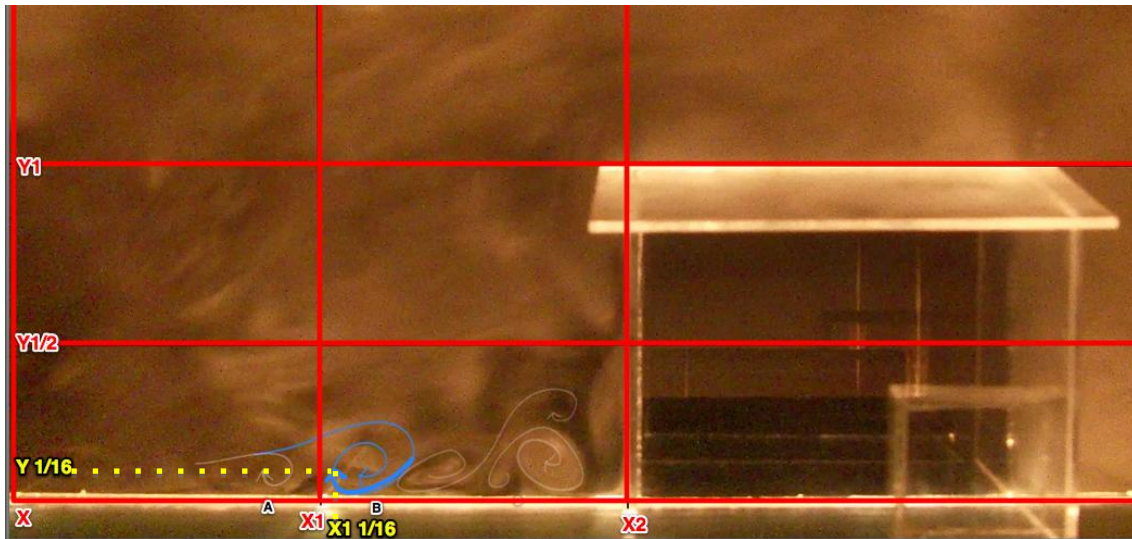


Figura 108 Movimiento ascendente en el eje X1 del modelo B

Posteriormente del choque del flujo. El aire continua ascendiendo, hasta colisionar nuevamente con un el flujo superior (vector rojo), el cual, fluye sobre los ejes (Y 1/16) y (X1 5/16), se observa que con las colisión que se presenta entre los flujo de aire, se cierra gradualmente la elipse para no truncar el desplazamiento del fluido, como se muestra en la



Figura 109 Colisión y movimiento ascendente en X1 del modelo B

En la Figura 110 se ve que sobre los ejes ($Y \frac{1}{4}$) y ($X \frac{1}{16}$) el flujo de aire que se desplaza helicoidalmente, en el sentido de las manecillas del reloj; paralelo al flujo superior (vector azul claro), el cual, tiene mayor presión que el flujo interior (vector rojo) es decir, que se desplaza descendientemente y ascendientemente formando una elipse, al interior del flujo superior, generando la formación de un movimiento en espiral en dirección horizontal en este caso lo denominaremos vórtice B.

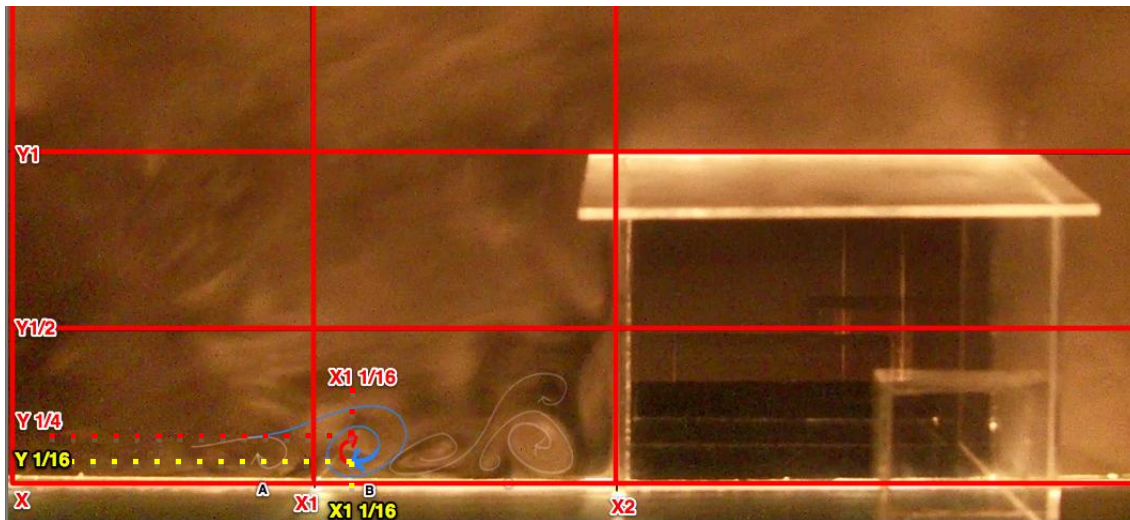


Figura 110 Movimientos del flujo ascendentes y descendentes en X1 del modelo B del modelo B.

El flujo continua la trayectoria en forma de espiral sobre el plano horizontal ($X1 \frac{1}{16}$) y ($Y \frac{1}{4}$) en dirección hacia el modelo arquitectónico, este comportamiento se puede observar en la Figura 110, sin deformaciones considerables en el espiral, inclusive se desplaza sobre formaciones helicoidales de aire o estancamiento de aire (vector amarillo), estos sirven de apoyo; ya que al pasar el flujos, continua sin interrupciones(vector amarillo), es decir, que estas formaciones elípticas, funcionan como peldaños para que el aire continúe su trayectoria en dirección hacia el modelo. Ver la Figura 111

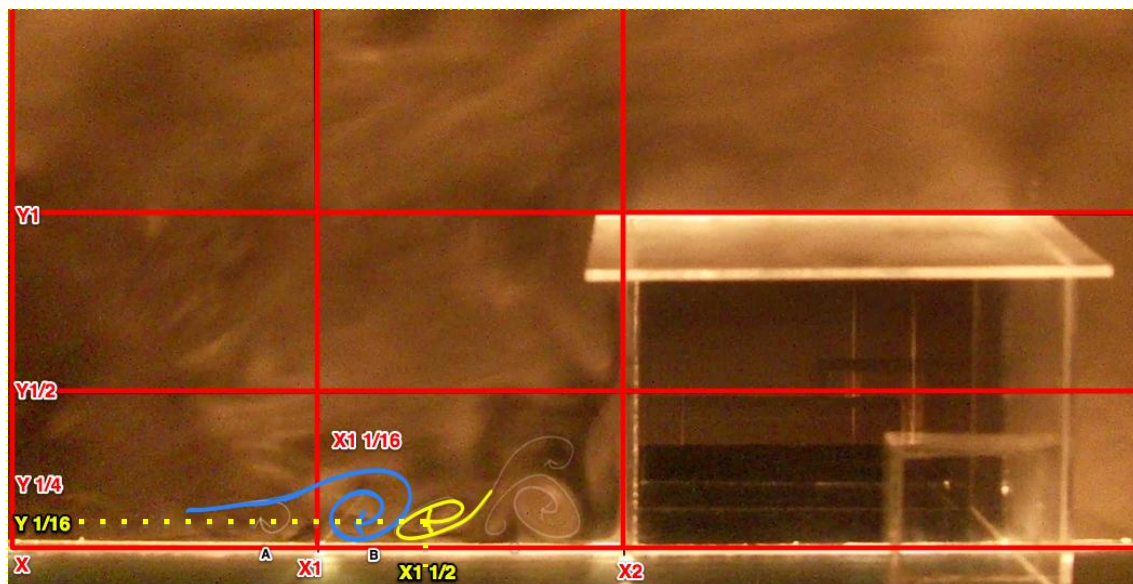


Figura 111 Trayectoria del flujo aire sobre un vórtice del modelo B.

El vórtice C inicia su formación al elevar la trayectoria del flujo y ascender en los ejes ($X1 \frac{3}{4}$) y ($Y \frac{3}{8}$) sobre un flujo helicoidal previo o estancamiento de aire, como se menciono anteriormente el estancamiento de aire sirve de apoyo para que continúe con la trayectoria.

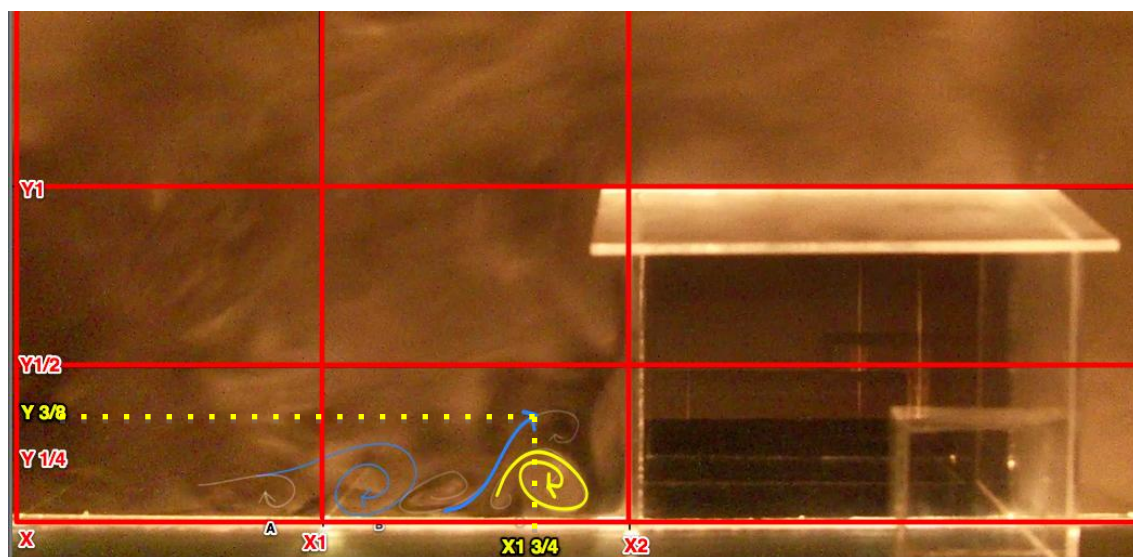


Figura 112 Trayectoria del flujo del aire sobre el estancamiento del modelo B.

En la Figura 113 se muestra la trayectoria del flujo del aire desciende sobre los ejes ($Y \frac{5}{15}$) y ($X1 \frac{13}{16}$) en sentido de las manecillas del reloj y sobre el estancamiento de aire que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj.

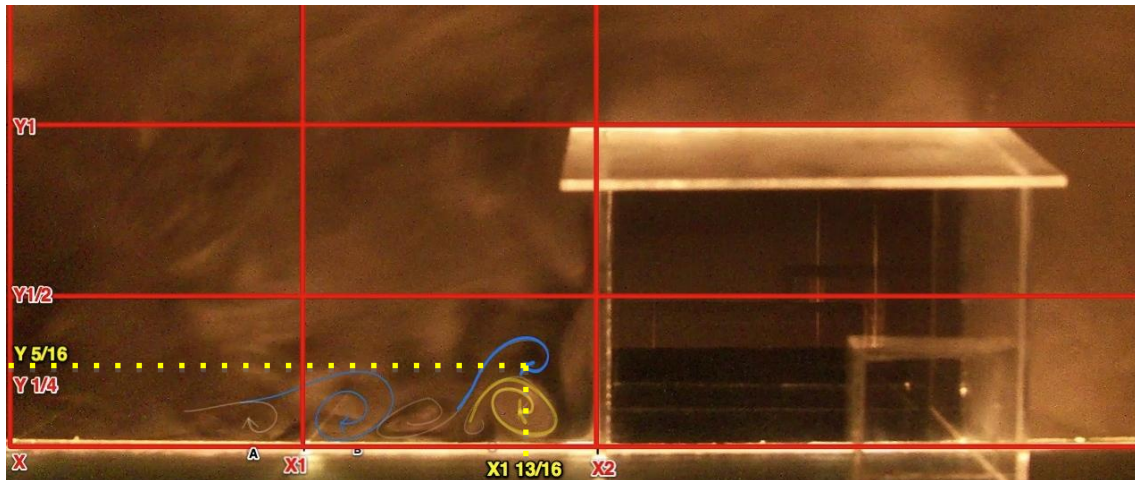


Figura 113 Descenso del flujo vórtice B sobre el estancamiento de aire del modelo B.

Una tercera línea de flujo de color (rojo) colisiona con el flujo que está en descenso, es decir, el vórtice B, el cual se ubica sobre en los ejes (X1 13/16) y (Y 5/16). Esta nueva línea de flujo empuja el vórtice B generando un movimiento en espiral, al interior de la nueva trayectoria. De esta manera se inicia la formación del vórtice que denominaremos C.

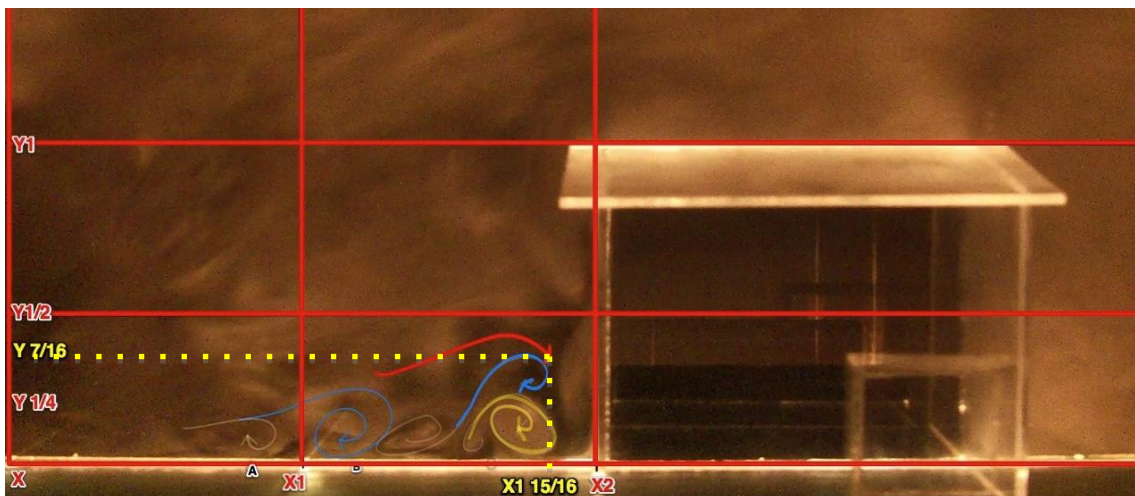


Figura 114 Tercera línea de flujo e inicio vórtice C del modelo B.

En la Figura 115 se muestra la tercera línea de flujo empuja el vórtice B, este flujo al avanzar envuelve el vórtice B, que continua su trayectoria con un giro helicoidal, el cual se va cerrando conforme la línea de trayectoria de flujo que lo envuelve avanza. La línea de flujo envolvente desciende en los ejes (X 1 7/8) y (Y 1/2)

colisiona con la base de la técnica de visualización continua su trayectoria en ascenso sobre los ejes ($X 1 \frac{1}{16}$).



Figura 115 Flujo envolvente e inicio vórtice C del modelo B.

Posteriormente el vórtice C se cierra completamente, hasta formar el vórtice C, el cual, continua su desplazamiento elíptico en forma de espiral sobre los ejes ($X 1 \frac{3}{4}$) y ($Y \frac{1}{2}$) representado por el vector azul.

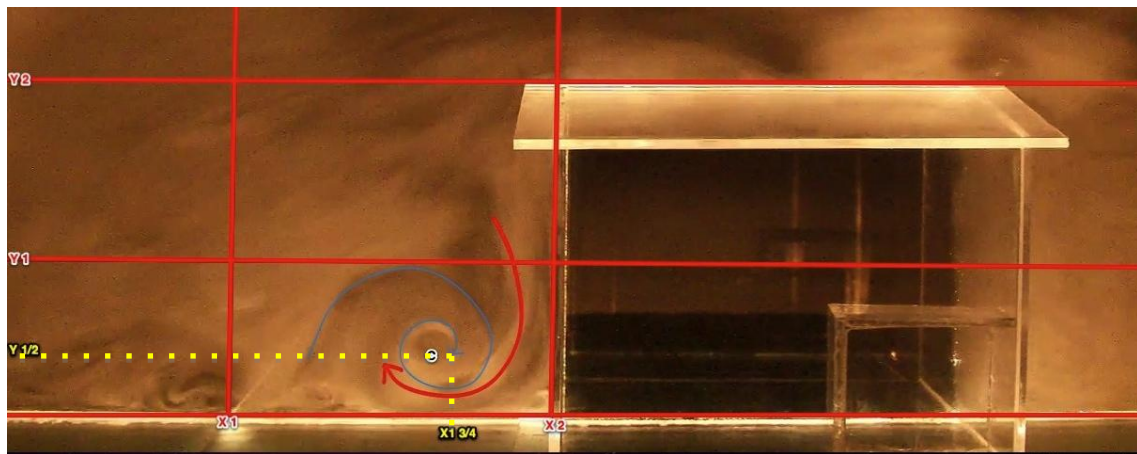


Figura 116 Finalización del vórtice C del modelo B.

Análisis de la región 2 en el volumen B.

En la Figura 117 se muestra que la región dos la comprende los ejes de referencia (X1, X2, X3 – Z2, Z3, Z4), para el desarrollo del análisis en la región dos, se realiza un acercamiento a la geometría, sobre los ejes que la comprenden.

Se observa que en esta región interactúan tres líneas de flujo, las cuales se representaran con vectores como lo son: la línea de flujo uno con el vector de color naranja, la línea de flujo dos con el vector verde, la línea de flujo tres con el vector azul y los estancamiento de aire con vectores de color cian.

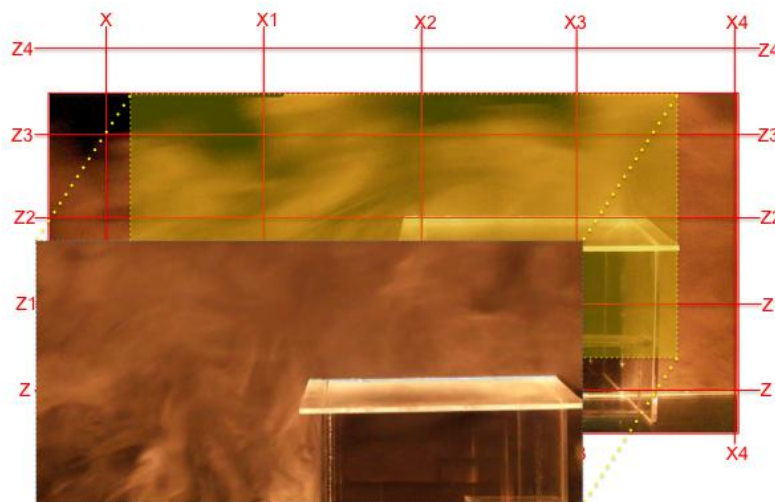


Figura 117 región 2 del volumen B.

El flujo que previamente se desplazó sobre la región uno (vector amarillo), el cual, ascendió sobre la fachada principal e interactuó con el alerón o voladizo de la cubierta en la geometría arquitectónica, continúa su desplazamiento sobre la región dos ascendentemente sobre los ejes (Z2 1/4 – X1 7/8).

Paralelo al flujo uno (vector naranja) se observa el desplazamiento del flujo dos que está representado con el (vector verde) mismo que continúa con una trayectoria en ascenso sobre los ejes (Z2 1/4 - X2 1/16). Sobre las dos anteriores líneas de flujo se visualiza el flujo tres (vector azul) el cual, presenta un desplazamiento horizontal y no interactuó previamente con la geometría, la trayectoria de este flujo es parabólica y se desplaza sobre el flujo uno (vector

naranja) y flujos dos (vector verde) sobrepasándolos hasta llegar a el eje ($Z3 - X2$ 7/8).

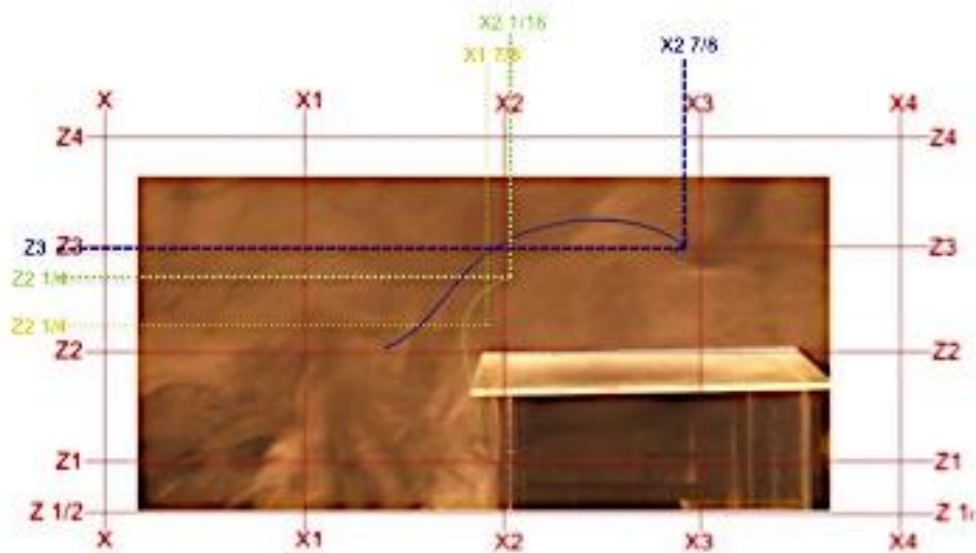


Figura 118 Interacción de las líneas de flujo en la región 2 del modelo B.

El flujo uno(vector naranja) desciende con un movimiento en helicoidal sobre los ejes ($Z2 \frac{1}{16} - X2 \frac{1}{6}$) hasta colisionar con la cubierta de la geometría dando inicio a la formación del vórtice (C). Paralelo al flujo uno se observa el flujo Dos (vector verde) así como el flujo tres (vector azul).

El flujo dos (vector naranja) continua con un desplazamiento ascendente parabólico sobre los ejes ($Z2 \frac{1}{4} - X2 \frac{3}{4}$) en este punto el flujo desciende y toma una dirección hacia la cubierta. Paralelo al anterior flujo y sobre este, se desplaza el flujo tres (vector verde) mismo, que desciende helicoidalmente sobre los ejes ($Z2 \frac{1}{4} - X2 \frac{1}{4}$).

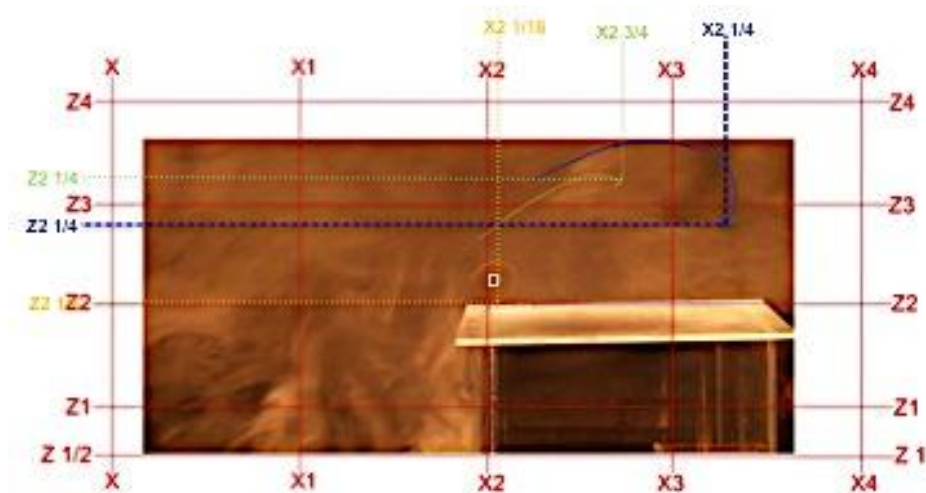


Figura 119 Formación del vórtice (D) en la región 2 del modelo B del modelo B.

El flujo uno (vector naranja)continua con un desplazamiento en helicoidal sobre los ejes ($Z2 \frac{1}{4} - X2 \frac{5}{6}$) en esta trayectoria del vórtice (D), colisiona con un estancamiento de aire , sobre el vórtice (D) se desplaza la línea de flujo dos(vector naranja) con un movimiento helicoidal en su trayectoria se inicia la formación del vórtice (E) sobre los ejes ($Z2 \frac{7}{6} - X2 \frac{3}{6}$). De igual manera el flujo tres (vector azul) desciende hasta colisionar con la geometría específicamente en eje central de la cubierta de la envolvente arquitectónica, desarrollando un movimiento helicoidal en sentido de las manecillas del reloj que forma el vórtice que denominaremos (F).

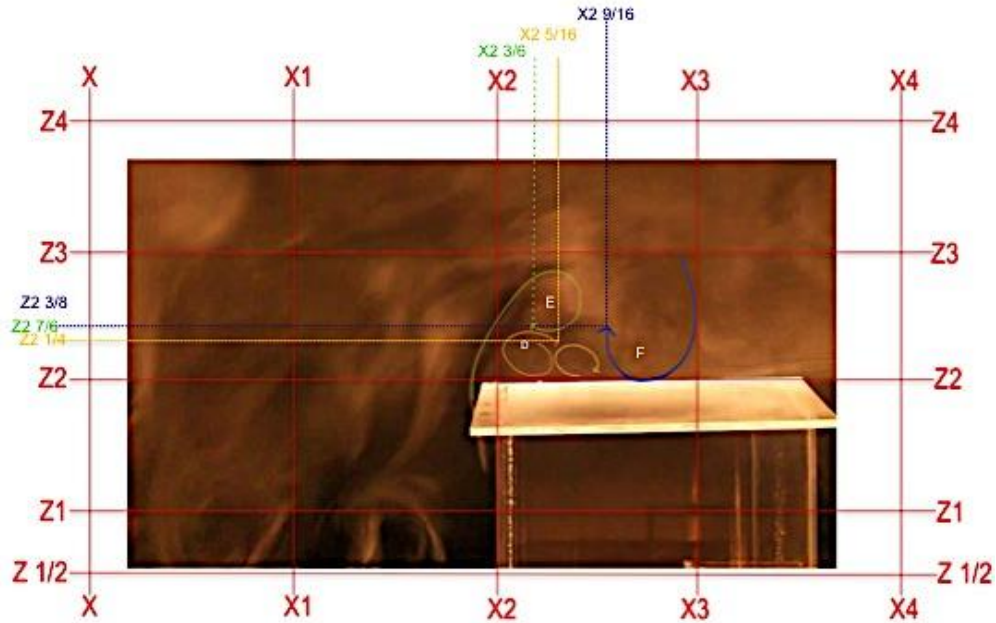


Figura 120 Formación del vórtice (F) en la región 2 del modelo B del modelo B.

En la Figura 121 se muestra que el vórtice (D) continua con su movimiento en espiral hasta colisionar con un estancamiento de aire sobre los ejes ($Z2 \frac{1}{8} - X2 \frac{3}{6}$), sobre este, y en los ejes ($Z2 \frac{3}{8} - X2 \frac{1}{4}$) se puede observar el movimiento en helicoidal del vórtice (E) ambos vórtices giran en forma de espiral paralelamente en sentido de las manecillas del reloj. Delante de ellos se observa el giro en helicoidal del vórtice (F) que empuja un estancamiento de aire, el cual, se encuentra en el centro de los vórtices.

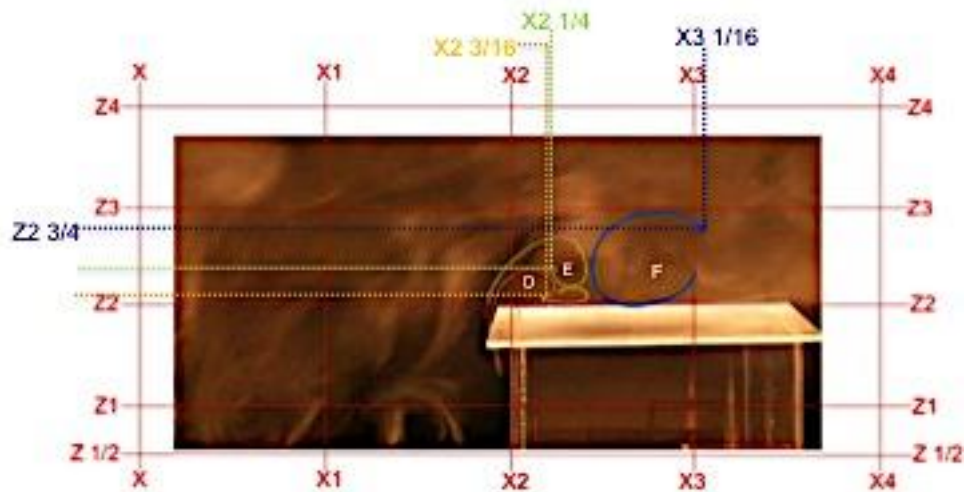


Figura 121 Colisión con estancamiento de aire de los vórtices (D), (E), (F) del modelo B.

El vórtice (D) en el punto ($Z2 \frac{3}{6} - X2 \frac{1}{6}$) cierra el espiral en helicoidal, esto originado por el vórtice (E) que lo empuja, mismo que continua con una trayectoria descendente y un movimiento helicoidal en la continuidad del desplazamiento se fusiona con el estancamiento de aire sobre los ejes ($Z2 \frac{5}{6} - X2 \frac{1}{8}$), este al descender da paso a una nueva línea de flujo que representaremos con el (vector cian) en la nueva línea de flujo, se observa un movimiento parabólico descendente, el cual, colisiona con el vórtice (F) desplazándolo horizontalmente e ingresando a la región de análisis 3.

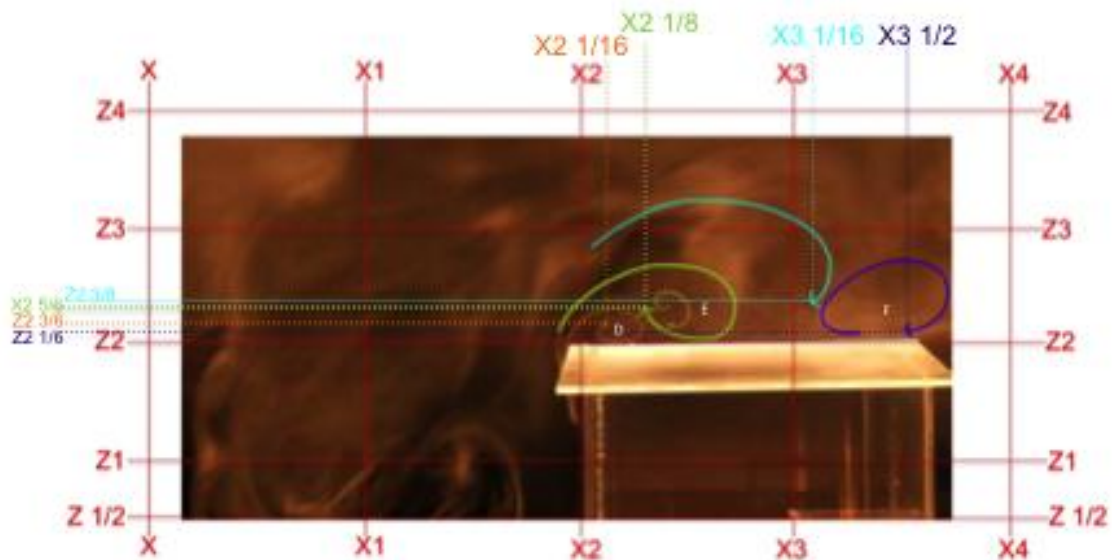


Figura 122 comportamiento de los vórtices en la zona B del modelo B

Análisis de la región 2 A

La región 2 la define la trayectoria del flujo, el cual, previamente interactuó con la región 1, y este en su recorrido desarrollo una deflexión y continua con una desplazamiento hacia la derecha e izquierda en referencia al centroide de la geometría o fachada principal, es decir, el flujo que interactúa sobre las fachadas laterales izquierda y derecha de la envolvente geométrica arquitectónica. Es necesario aclarar que el Angulo de visualización en esta región cambia a un ángulo de 90° o una vista aérea de la geometría.

Así mismo precisar que para el desarrollo del análisis se plantea una simplificación de la región 2, esta consiste en dividir dicha región en dos subregiones: la región 2A y la región 2B, que nos permiten realizar un análisis a detalle del los movimientos del flujo del aire sobre los planos horizontales de la fachadas laterales.

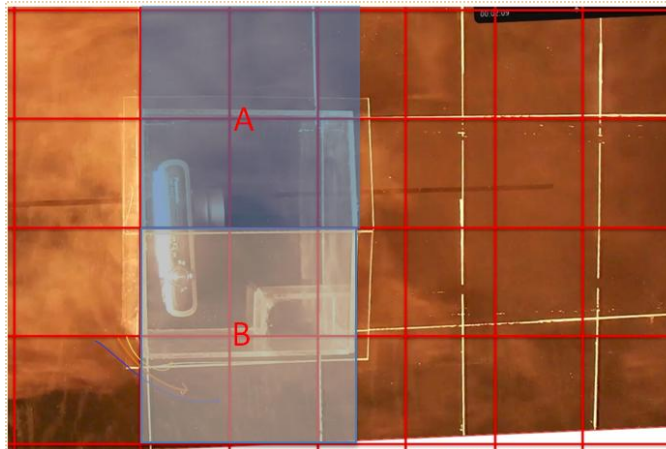


Figura 123 Región 2, Subregiones de análisis 2A y 2B del modelo B.

A continuación en la Figura 124 se describe la región (A) que la comprende la fachada lateral izquierda sobre los ejes (A, A1, A2- X2,X3,X4..X7) en esta región se observa el flujo que desarrollo una deflexión hacia la derecha en referencia a la fachada principal, es decir, que el desplazamiento del flujo cambio la trayectoria hacia la derecha y posteriormente interactuar sobre la fachada lateral izquierda.

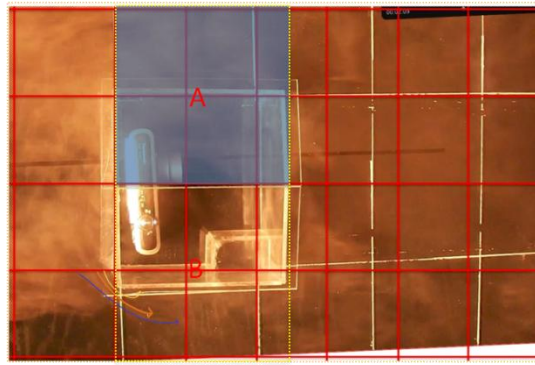


Figura 124 Región 2 subregión A (2A) del modelo B

En la subregión (2a) se observan tres líneas de flujo, que se representaran con vectores: la línea uno con un vector amarillo, la línea dos con un vector de color naranja y la línea tres con un vector de color azul. La trayectoria del flujo que antecede del la región 1, presenta un desplazamiento en parábola sobre el ejes (A2, A1 - X2, X3).

Posteriormente en la Figura 125 se observa que la línea de flujo uno (vector amarillo) se desplaza en sentido contrario de las manecillas del reloj, misma que sobre los ejes (A1 $\frac{3}{4}$ - x2 $\frac{3}{8}$) desarrolla un giro helicoidal, Paralelo a esta línea de flujo y sobre ella, se observan dos líneas de flujo, una de ellas es la línea de flujo dos representada con el (vector Azul) que desarrolla una trayectoria en parábola sobre los ejes (A1 $\frac{3}{8}$ -X2 $\frac{7}{8}$). Así como también se observa la línea de flujo tres (vector naranja) que presenta una trayectoria en parábola sobre los ejes (A1 $\frac{3}{8}$ – X2 $\frac{7}{8}$).

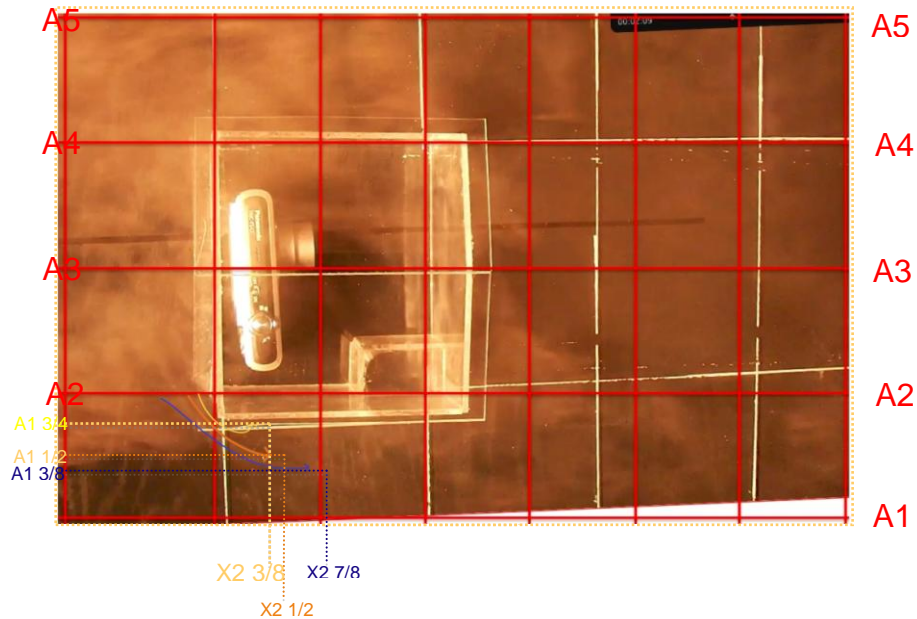


Figura 125 Desplazamiento del flujo sobre la región (2A) del modelo B.

En la línea de flujo uno (vector color amarillo) continua con el desplazamiento en el helicoidal sobre los ejes ($A1 \frac{1}{2}$ - $x2 \frac{1}{2}$) en este punto se cierra la línea de flujo y avanza en forma de espiral, sobre el plano horizontal de la fachada posterior derecha, Iniciando la formación del vórtice que denominaremos vórtice (G). La línea de flujo dos (vector color naranja) continua con un desplazamiento en parábola sobre los ejes ($A1 \frac{1}{2}$ - $X2 \frac{5}{8}$). El flujo tres presenta una trayectoria de desplazamiento en parábola sobre los ejes ($A1$ – $X2 \frac{1}{8}$).

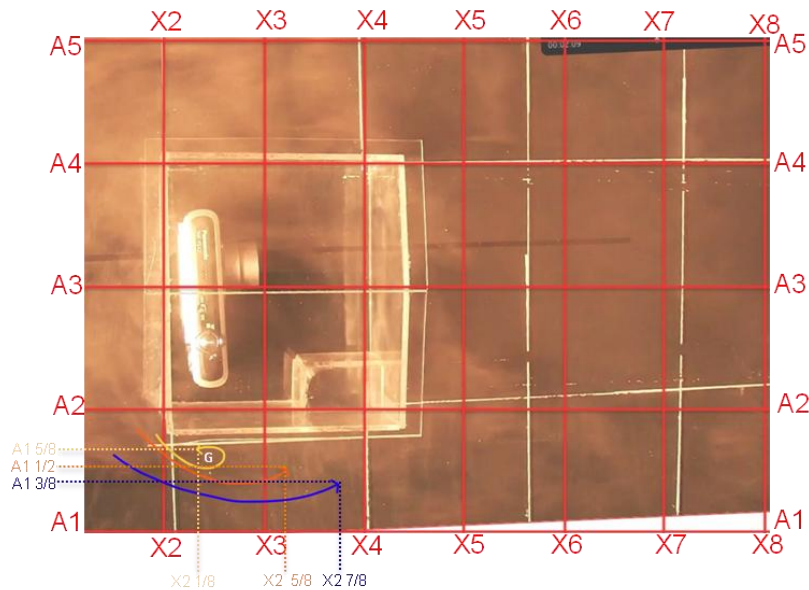


Figura 126 Formación del vórtice (G) en la región (2A) del modelo B.

El flujo uno (vector amarillo) se desplaza en espiral en los ejes (A1- X2 1/8) sobre el plano horizontal de la fachada lateral izquierda por arriba de este flujo (vector amarillo) se observa la trayectoria del flujo dos (vector naranja) que se desplaza con un movimiento helicoidal sobre los ejes (A1 1/2 -X2 1/8) formando un vórtice que denominaremos vórtice (H) .

También se observa el flujo tres(vector azul), el cual se desplaza sobre el vórtice (G) y (H) con una trayectoria parabólica, en el punto (A1 13/6 – X2 1/8) el flujo tres (vector azul) desarrolla una trayectoria helicoidal, dando inicio la formación del vórtice (I).

En la Figura 127 se observa que la fachada lateral izquierda cuenta con un retroceso de 2m * 1m * 2m donde se acumulan estancamientos de aire que sirven como base para el desplazamiento del flujo.

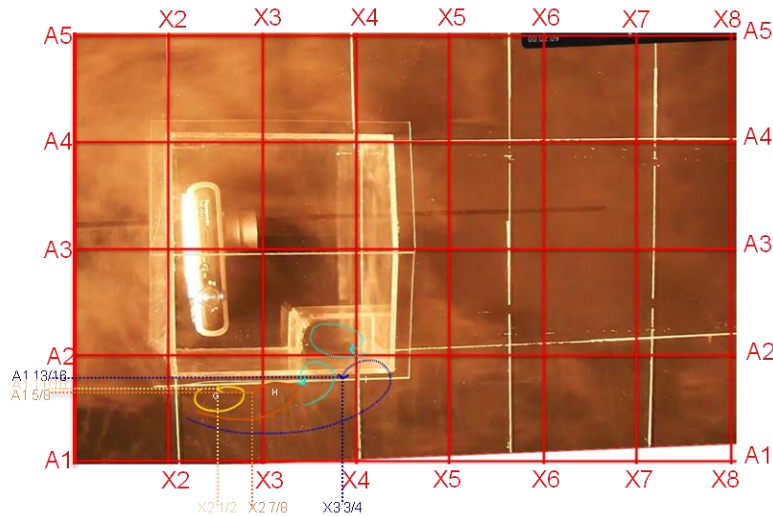


Figura 127 Formación del vórtice (H) (I) en la región 2A del modelo B.

El vórtice (G) se desplaza helicoidalmente en los ejes ($A1 \frac{1}{2}$ - $X2 \frac{1}{4}$) sobre el plano horizontal de la fachada posterior izquierda, Delante de este se desplaza el vórtice (H) sobre los ejes ($A1 \frac{1}{2}$ – $X2 \frac{1}{4}$) con una trayectoria en espiral en sentido contrario a las manecillas del reloj, este flujo continua y colisiona con un estancamiento de aire, el cual, es desintegrando, por lo que una parte es impulsada a el cajón de retroceso del acceso a la geometría arquitectónica, y el resto del estancamiento se fusionara posteriormente a el vórtice (H). La colisión también impulsa el vórtice (I) que se desplaza con una trayectoria helicoidal y se fusiona con los estancamientos de aire que se encuentran en el cajón de acceso sobre los ejes ($A1 \frac{5}{8}$ – $X3 \frac{3}{5}$)

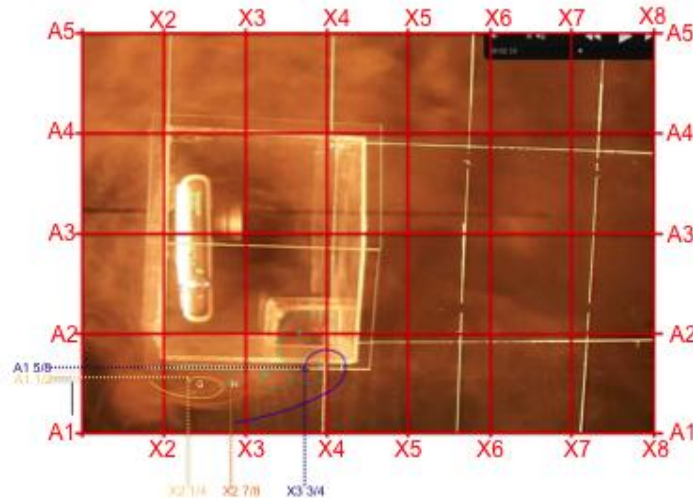


Figura 128 Fusión de estancamientos de aire con los vórtices (H), (I)

El vórtice (G) continua con su desplazamiento en espiral pasando sobre un estancamiento de aire sobre los ejes (A1 5/8 –X2 1/4), frente a este se observa el vórtice (H) que se desplaza helicoidalmente y ya fusiono por completo el estancamiento de aire en punto (A1 9/16 –X2 7/8). Así como también el vórtice (I) sobre los ejes (A1 9/6 –X2 7/8) se fusiono con un porcentaje del estancamiento de aire que se encontraba en el cajón de acceso de la geometría arquitectónica, y continua con el desplazamiento en forma de espiral sobre el plano horizontal de la fachada lateral izquierda.

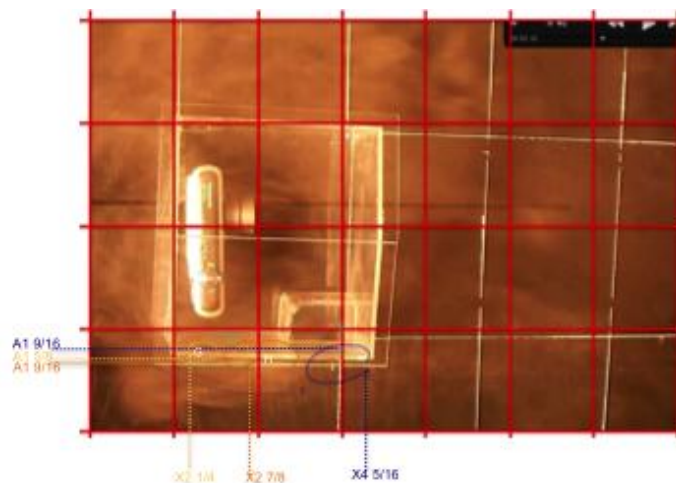


Figura 129 Desplazamiento de los vórtices (G), (H), (I) sobre el plano horizontal de la fachada izquierda del modelo B.

En la Figura 130 se muestra que el vórtice (G) continua con su desplazamiento sobre el plano horizontal de la fachada lateral izquierda sobre los ejes ($A1 \frac{3}{8} - X2 \frac{3}{4}$), al igual que el vórtice (H) se desplaza con un movimiento helicoidal sobre los ejes ($A1 \frac{1}{2} - X3 \frac{1}{4}$) posteriormente rosa el vórtice e impulsa (I) que continua con una trayectoria en helicoidal y cambia de dirección hacia la derecha desplazándose sobre la región tres con un movimiento en sentido de las manecillas del reloj.

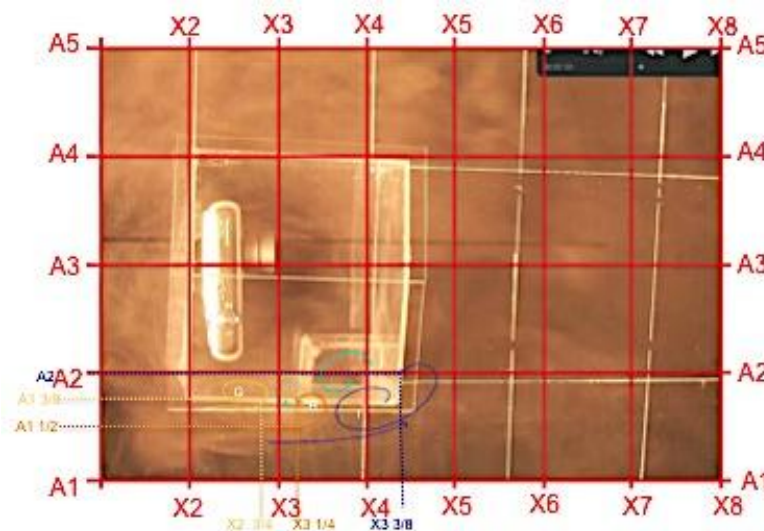


Figura 130 Desarrollo de los vórtices (G), (H), (I) sobre el plano horizontal de la fachada izquierda del modelo B

Análisis de la región 2 B.

La región (B) que la comprende la fachada lateral derecha sobre los ejes (A4, A5-X2,X3,X4) en esta región se observa el flujo que cambia la dirección hacia la izquierda en referencia a la fachada principal, es decir, que el desplazamiento del flujo tiene una trayectoria en sentido parabólico izquierdo y posteriormente interactuar sobre la fachada lateral derecha como se observa en la Figura 131

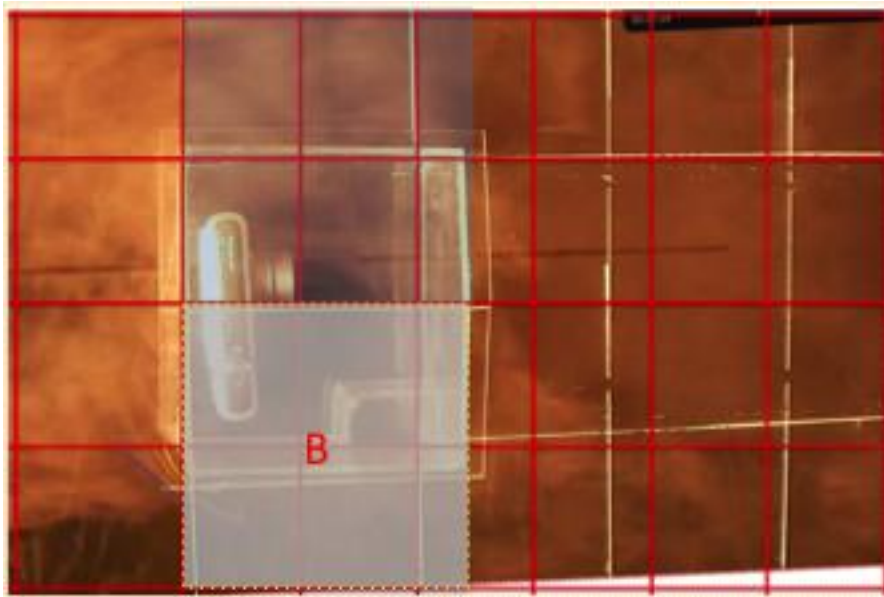


Figura 131 Región de análisis 2 B del modelo B.

El flujo que transita sobre la región 2 B, es aquel que previamente interactuó sobre la región 1 y desarrollo un cambio de dirección hacia la izquierda, ingresando a la región 2B, este flujo se compone de tres líneas de flujo que representaremos con vectores de colores y los denominaremos flujo uno, dos y tres.

El flujo uno (vector amarillo) se desplaza con una trayectoria parabólica sobre los ejes ($A4 \frac{1}{8} - X2 \frac{1}{4}$) para posteriormente desarrollar un movimiento en helicoidal. sobre este, se desplaza y avanza el flujo dos (Vector naranja) con movimiento parabólico que en el trayecto cambia a un movimiento en helicoidal sobre los ejes ($X2 \frac{1}{2} - A4 \frac{1}{8}$). Así como también se observa la línea de flujo tres (Vector azul) que se desplaza y avanza con un movimiento parabólico sobre el flujo uno y dos, estas líneas de flujo se desplazan con un movimiento contrario a las manecillas del reloj

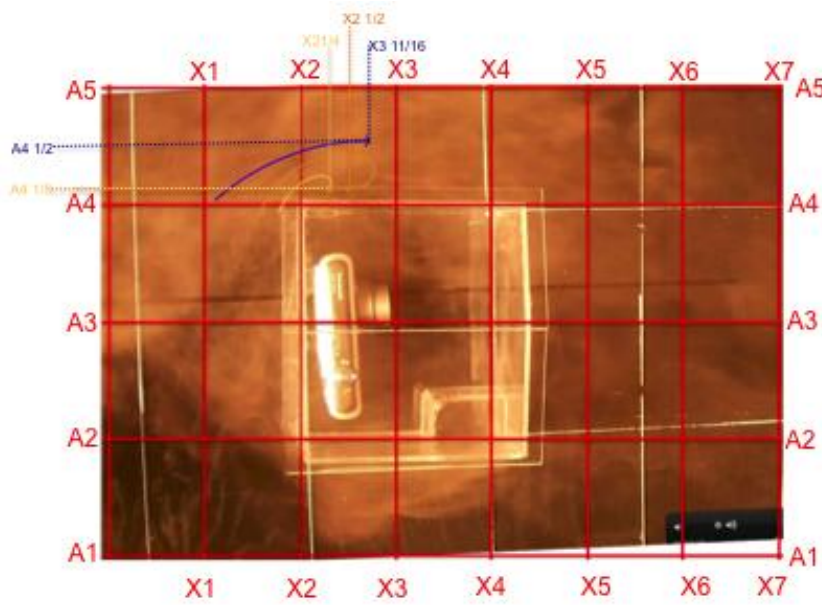


Figura 132 Desplazamiento de las líneas de aire sobre la región 2B

Se observa que la línea de flujo uno (vector amarillo) cambia el movimiento de trayectoria, ha un desplazamiento en helicoidal sobre los ejes ($A1 \frac{5}{8} - X2 \frac{1}{8}$) en este punto da inicio la formación del vórtice que denominaremos (D). El flujo dos (vector Naranja) de igual presenta un movimiento en espiral dando pie a lo formación del vórtice (E) sobre el eje ($A4 \frac{1}{8} - X2 \frac{1}{4}$). Así como también se observa el flujo tres (Vector azul) con un desplazamiento parabólico sobre la formación de los vórtices en los ejes ($A4 \frac{1}{2} - X3 \frac{1}{4}$)

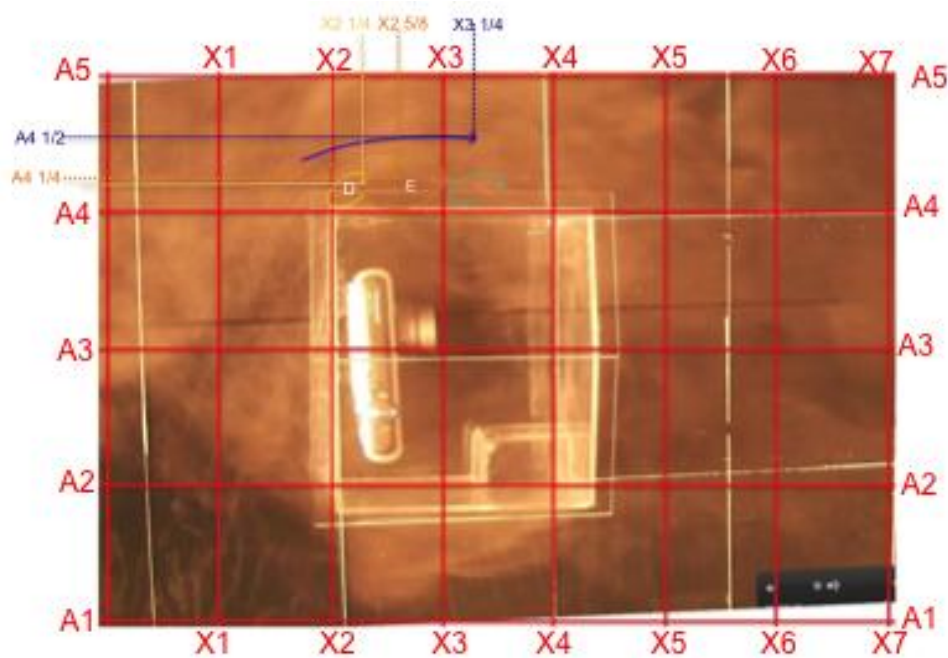


Figura 133 Formación de los vórtices D y E del modelo B.

La línea de flujo uno (vector amarillo) o El vórtice (D) se desplaza horizontalmente en sentido de las manecillas del reloj sobre el plano de la fachada lateral izquierda y sobre el eje ($A4 \frac{1}{8} - X4 \frac{11}{6}$) colisiona con un estancamiento de aire .

El vórtice E se desplaza en sentido helicoidal en el punto ($A4 \frac{3}{6} - X5 \frac{1}{8}$) y colisiona y pasa sobre el estancamiento con el cual el vórtice (D) colisionó anteriormente.

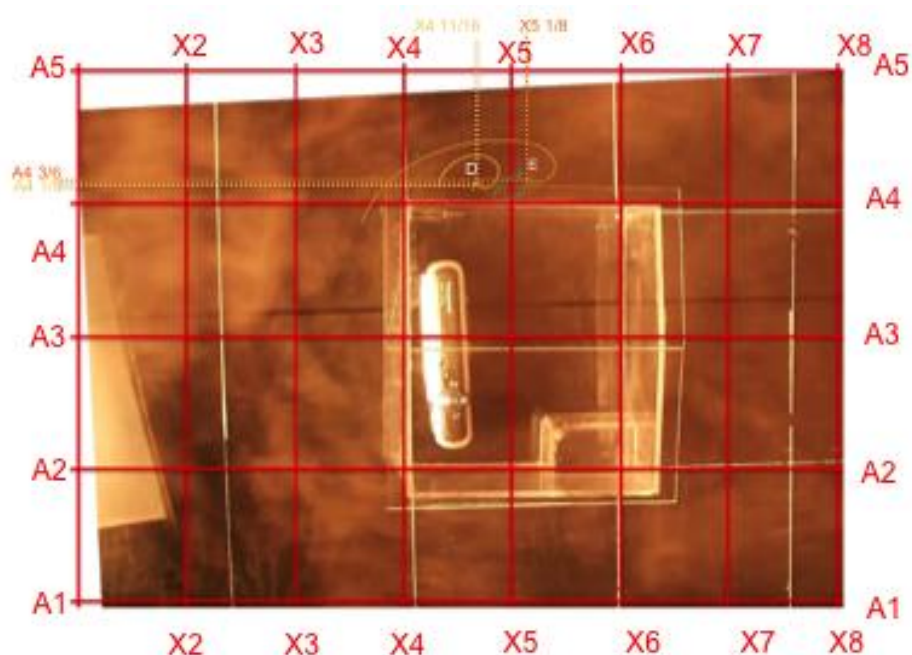


Figura 134 Colisión del vórtice D y E con el estancamiento del modelo B.

El vórtice (E) en el punto $(A4 \frac{5}{6} - X3 \frac{1}{8})$ fusiona el vórtice (D) para formar un solo vórtice que denominaremos vórtice (E), sobre este se observa una nueva línea de flujo que representaremos con un vector azul, el cual tiene un movimiento parabólico y colisiona con la fachada lateral derecha sobre los ejes $(A3 \frac{15}{16} - X4 \frac{7}{6})$. Así como antes de la formación del vórtice (E) se observa la formación del vórtice predecesor al vórtice (D).

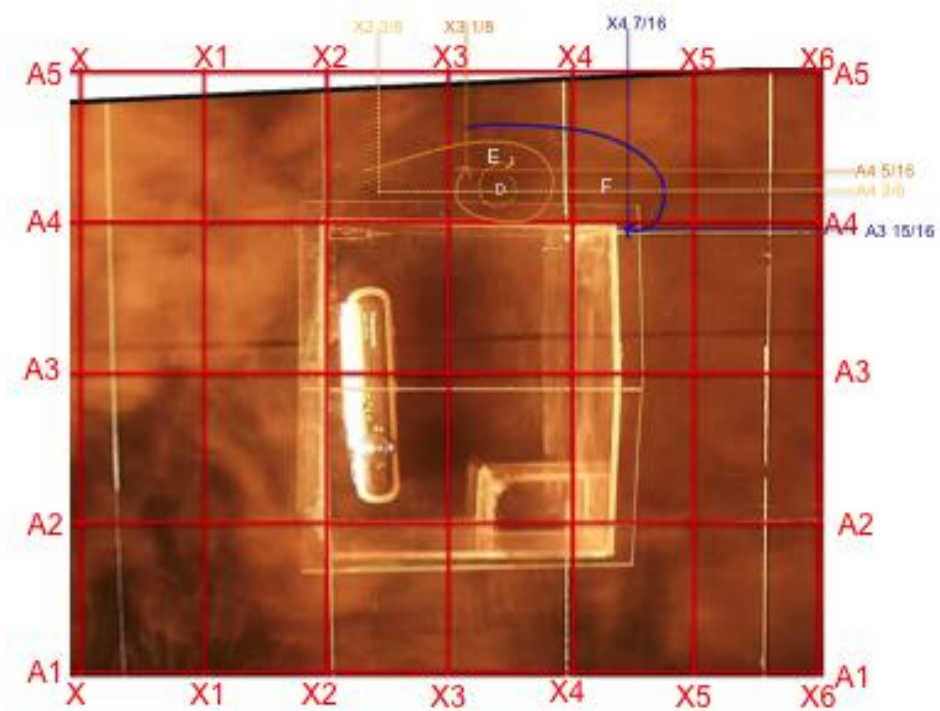


Figura 135 Fusión del vórtice (D) con el (E) en la región 2B del modelo B.

La formación del naciente vórtice (E'') se desplaza con un movimiento en helicoidal en sentido de las manecillas del reloj con un movimiento en helicoidal sobre los ejes ($A4 \frac{3}{6} - X3 \frac{15}{16}$) colisiona con el vórtice (F) apoyándola en el desplazamiento hacia la región 3 sobre los ejes ($A3 \frac{11}{16} - X4 \frac{3}{8}$), Así como también se observa el vórtice (E'') que se desplaza horizontalmente sobre el plano vertical de la fachada lateral derecha.

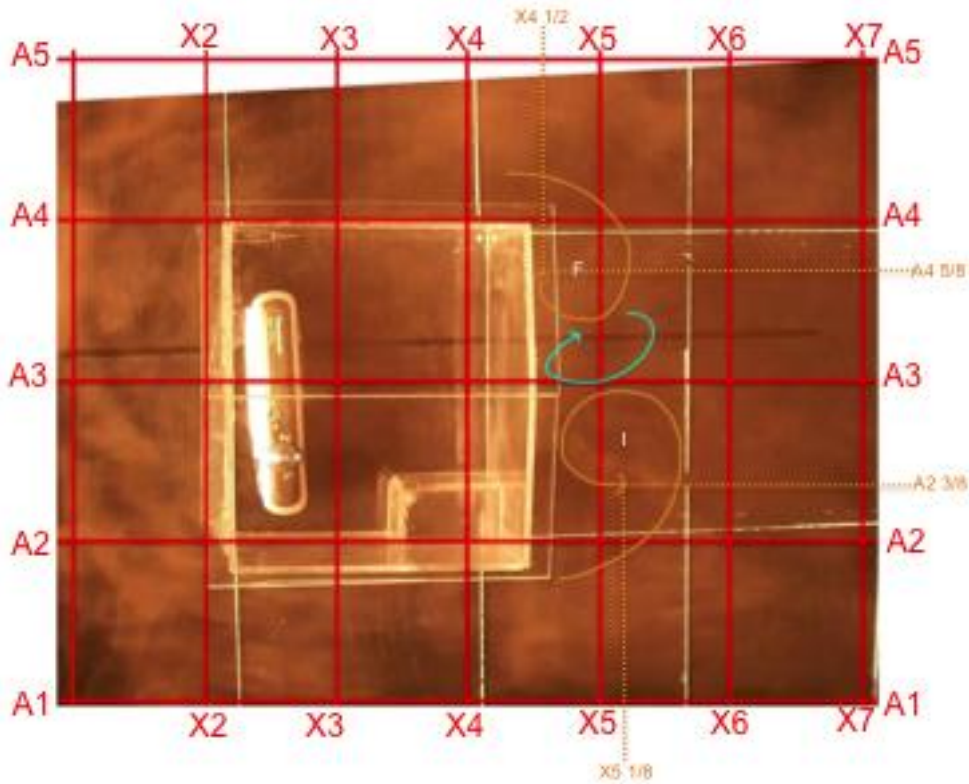


Figura 137 Ingreso de los vórtices F y I a la región 3 del modelo B.

El vórtice (F) al continuar con su movimiento en espiral se fusiona con el estancamiento de aire y continua su trayectoria sobre los ejes ($A3 \frac{3}{8} - X6 \frac{1}{4}$) en el anterior punto este vórtice roza el vórtice (I) desplazándose sobre el con una distancia muy corta. Estos vórtices son empujados por formaciones que se desplazaron previamente sobre las regiones 2A y 2B, El vórtice (F) es el primero en ser empujado en el punto ($X5 \frac{3}{4} - A1 \frac{5}{8}$). Así como también observamos dos desplazamientos parabólicos sobre la región 2 A Y 2B, los cuales, se representaran con vectores de color azul, El procedente de la región 2 A se observa en el eje ($A5 \frac{3}{8} - X6 \frac{7}{8}$). Y el desplazamiento parabólico proveniente de la región 2 B se observa en el punto ($X7 \frac{3}{6} - A1 \frac{7}{6}$).

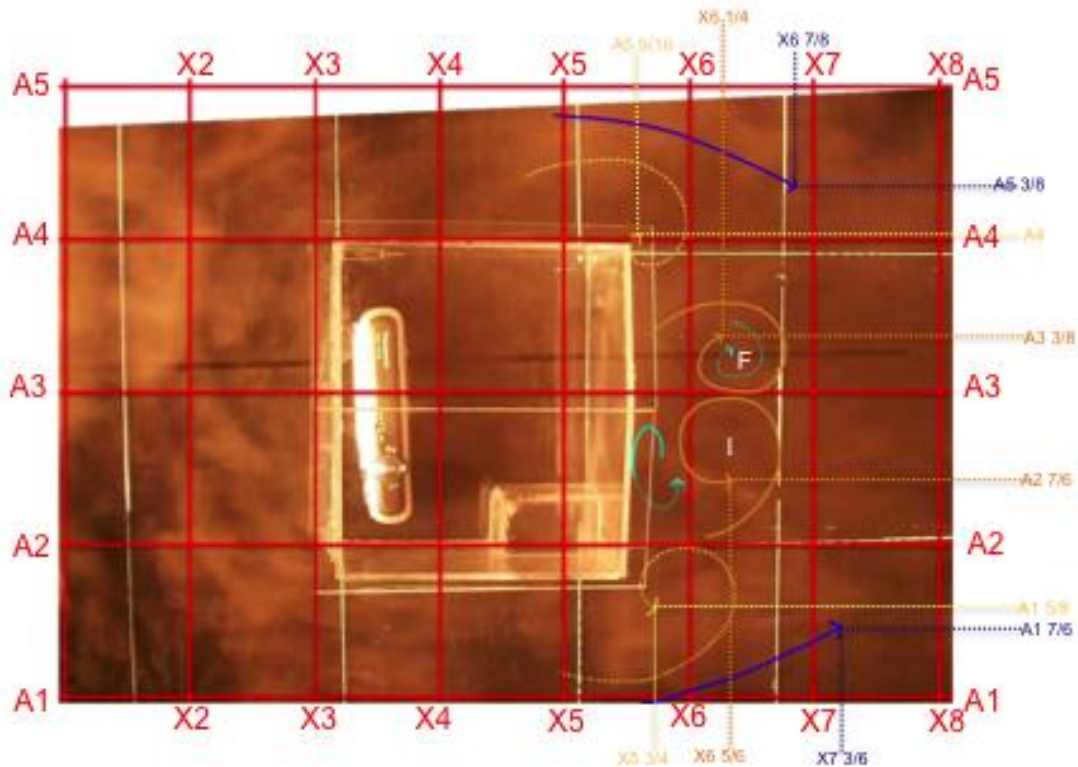


Figura 138 Formación de los caminos de von Kármán del modelo B.

El vórtice (F) se desplaza con una trayectoria en helicoidal en horizontal en el punto (X5 ¼ - A3 7/8) este, roza el vórtice que va paralelo, es decir el vórtice (I) adelantándolo, El vórtice (i) queda ligeramente atrás pero continua su trayectoria en sentido de las manecillas del reloj.

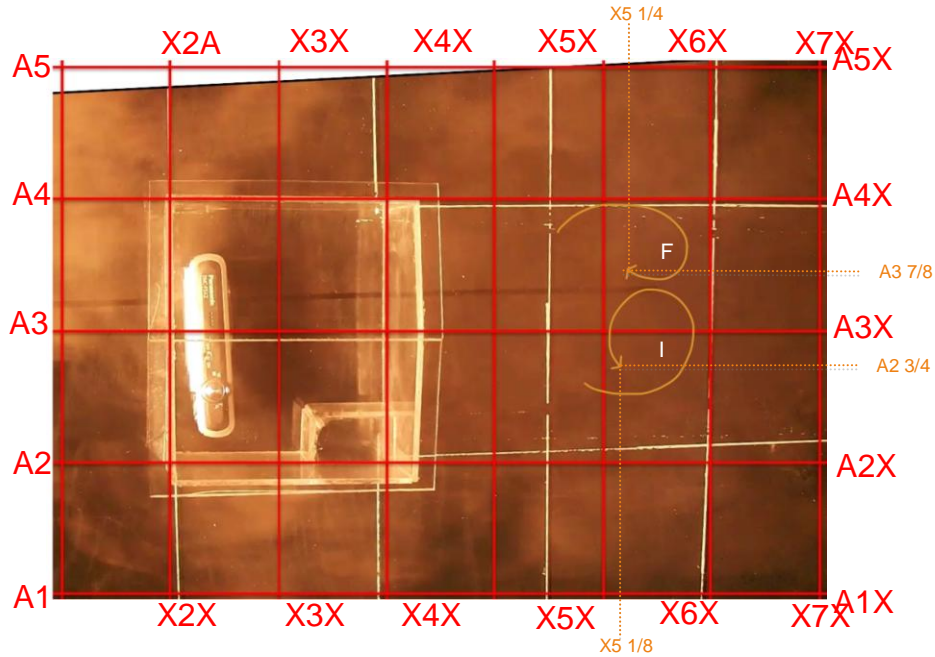


Figura 139 Desplazamiento paralelo de los vórtices F y I del modelo B.

El vórtice (F) rebasa completamente el vórtice (i) con un movimiento helicoidal en sentido de las manecillas del reloj y continua con un desplazamiento helicoidal hasta fusionarse con el flujo lateral que no interactuó con el volumen de la geometría, el cual no se tiene registro ya que la óptica de la cámara no permite abrir más el plano de estudio. En la región 3 podemos observar la formación de los caminos de vórtices de von Kármán y la trayectoria de desplazamiento que estos desarrollan.

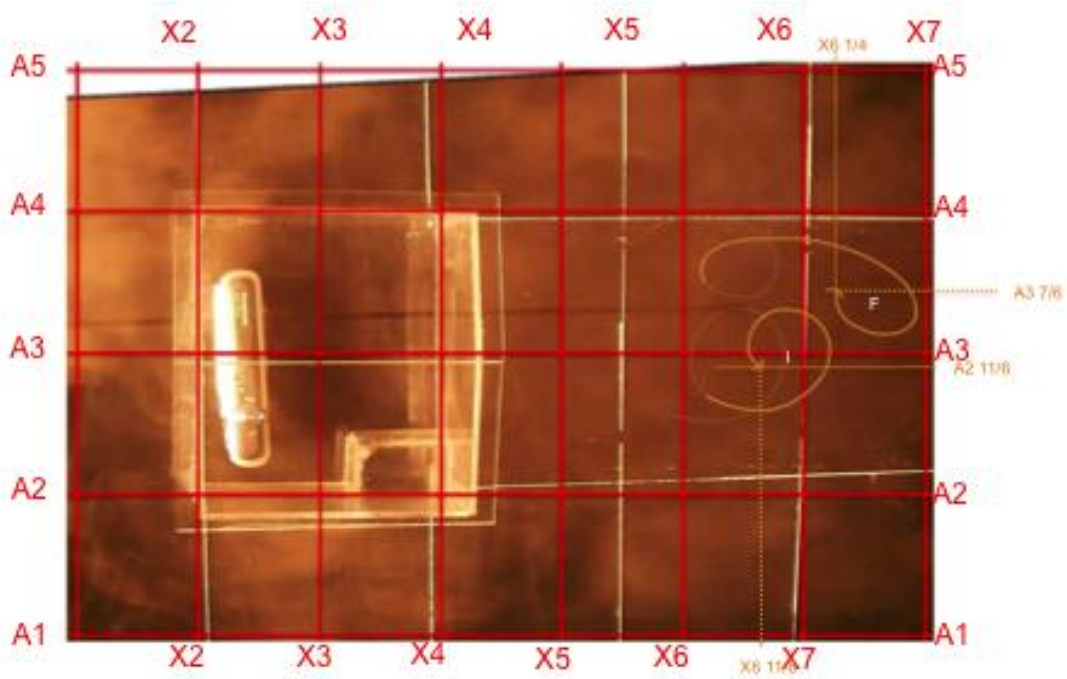


Figura 140 Desarrollo de los vórtices en la región C del modelo B.

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- I. Se implementó exitosamente la técnica de visualización en un túnel aerodinámico que permite el análisis de un conjunto de imágenes para obtener las líneas de corriente y describen el comportamiento del aire alrededor de una envolvente arquitectónica en un espacio tridimensional.

Mediante esta técnica es posible estudiar detalladamente diferentes planos de visualización en diferentes ángulos, ya que una vez instalada la fuente de iluminación, es posible estudiar planos verticales, horizontales y en cualquier ángulo de acuerdo con las características geométricas de los casos de estudio.

Aún cuando se utiliza un equipo para la generación de humo para la visualización de los resultados presentados en este trabajo, es posible utilizar partículas luminiscentes para obtener una visualización diferente del comportamiento del aire en regiones donde regularmente existe un estancamiento.

Las partículas que se proponen para este tipo de experimento pueden ser de dos clases, luminiscentes para la determinación de los vectores de velocidad de las partículas a través de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas y para el segundo experimento, luminiscentes y de bajo punto de fusión para colorear las partículas de acuerdo con el grado de interacción con las paredes de la envolvente.

Es recomendable que se instale una trampa de partículas antes de los ventiladores del túnel aerodinámico con la finalidad de recuperar estas partículas.

- II. Se instaló y se puso en marcha un sistema de iluminación al interior del túnel aerodinámico que permite visualizar la trayectoria de las corrientes de aire en el volumen de control.

La fuente lumínica puede llegar a generar el suficiente calor en la zona de pruebas como para modificar la densidad del aire en la zona de pruebas . Por ello se recomienda tener un sensor de temperatura en los alrededores de la envolvente arquitectónica.

La fuente lumínica genera la energía lumínica para capturar la información por medio de la cámara de alta velocidad sin deslumbramiento o algún tipo de defecto óptico sobre las imágenes adquiridas.

Se recomienda ampliamente utilizar las características del material utilizado en la elaboración de los casos de estudio debido a las condiciones de temperatura que pueden alcanzarse en el túnel.

Se recomienda además que la base de los modelos sea de vidrio templado para soportar las altas temperaturas que se alcanzan después de un periodo de 15 minutos de las pruebas.

- III. Se desarrolló una adaptación al sistema de referencia rectangular para el análisis del flujo del aire en envolventes arquitectónicas.

Esta modificación al sistema de referencia permite describir con precisión la información que se presenta en la tesis debido a que es intuitiva debido a la integración de conocimientos en la arquitectura.

Al observar las dificultades de interpretar la información, fue necesario simplificar en la medida de lo posible los fundamentos matemáticos con los cuales está basado el presente análisis de manera que utilicemos cotidianamente los sistemas de referencia con aplicación a la arquitectura.

5.2. RECOMENDACIONES

- I. El túnel aerodinámico es una herramienta con una enorme diversificación para aplicaciones en la Ingeniería y el Diseño. Por ello es necesario que el espacio en donde se encuentra cuente con una entrada de aire lo suficientemente amplia que permita el paso libre del aire.

- II. Se propone una reorientación de la instalación a fin de evitar el bloqueo del flujo de aire hacia la campana del túnel.
- III. Es necesario que las tomas de energía eléctrica se remuevan de la instalación para evitar que la vibración del túnel aerodinámico afecte sobre las mediciones, ya que esto puede influir negativamente sobre las variaciones de voltaje.
- IV. Instalar bases anti-vibratorias en los soportes del túnel y el soporte de los ventiladores con la finalidad de eliminar los efectos de vibración en la zona de pruebas del túnel aerodinámico.
- V. Instalar un equipo de aire acondicionado con la finalidad de controlar la temperatura y humedad de la zona donde se encuentra el túnel aerodinámico.

REFERENCIAS

1. Desconocido. *Meteorología Básica* 2010 [cited 2013; Radiación Solar]. Available from: <http://meteobasica.blogspot.mx/>.
2. Garcia Chavez, J.R. and V. Fuentes Fraixanet, *Viento y Arquitectura. El viento como factor de diseño arquitectónico*. Third ed. 2005, Mexico: Trillas.
3. Florensa, R.S., *Arquitectura y clima, Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. 1997: Gustavo Gili.
4. Garcia Chavez, J.R. and V. Fuentes Freixanet, *Viento y arquitectura el viento como factor de diseño arquitectónico*. Third ed. 2005, Mexico: Trillas. 186.
5. CONAVI, *Estadística de Vivienda*, C.N.d. Vivienda, Editor. 2009, CONAVI: Distrito Federal.
6. CONAFOVI, *Rezago habitacional*, CONAFOVI, Editor. 2009, CONAFOVI: Mexico.
7. INFONAVIT, *Plan financiero 2012-2016*, INFONAVIT, Editor. 2012, INFONAVIT: Mexico.
8. CONAVI, *Código de edificación de vivienda*, CONAVI, Editor. 2011, CONAVI: Mexico.
9. Robert W. Fox, A.T.M., Philip J. Pritchard *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. 1989
Nueva Editorial Interamericana. 750
10. Hansen, A.G., *Mecánica de Fluidos*. 1971: Limusa.
11. Real Ramírez, C.A., *Diseño Aerodinámico Experimental - Notas para el curso taller*. 2011, Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.
12. Ribes, S. *Proyecto: Ahorro de Combustible y Flujo de fluidos*. 2011; Available from: <http://praktikum2011etsid.blogs.upv.es/2011/06/27/dia-1-proyecto-ahorro-de-combustible-y-flujo-de-fluidos/>.
13. Merle C. Potter, D.C.W., *Mecánica de fluidos*. 2002, México: Thomson. 77|.
14. Desconocido. *Vórtices Karman*. 2012 [cited 2013; Available from: <http://rainforestradio.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/02/vortices-karman.jpg>.

15. Velázquez Soto, J.M., *Análisis físico y numérico del comportamiento del flujo de aire de un edificio*, in *Materiales*. 2012, Universidad Autónoma Metropolitana: Mexico. p. 220.
16. Frits, H.P. and T.v. Walsum, *Fluid Flow Visualization*. Focus on Scientific Visualization. 1993, Berlin: Springer.
17. Meza, A.F., *Caracterización del comportamiento del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana: como herramienta para estudios de modelos arquitectónicos*, in *Medio Ambiente*. 2008, Universidad Autónoma Metropolitana: Mexico.
18. Rodriguez, F., *Aplicaciones de la aerodinámica experimental a la arquitectura bioclimática*, in *ESIA*. 2005, Instituto Politécnico Nacional: Mexico.
19. Absoger. *Controlled atmosphere*. 2012; Available from: <http://www.absoger-controlled-atmosphere-nitrogen-generator.com/>.
20. NIST. *Design and In-Situ Performance of Vapor Compression System Project*. 2011 [cited 2013; Available from: http://www.nist.gov/el/building_environment/hvac/dipvc.cfm.

CURRICULUM VITAE

ALBERTH FABIAN VELASCO SANDOVAL

Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo
Especialista en Diseño Bioclimático



Fecha de nacimiento: 7 Junio 1982

Nacionalidad: Colombiana

CURP: VESA820607NEHLE

Av. Insurgentes 420 Departamento 8, Colonia Roma sur

Cel: (0052)(55) 27728104

Tel: (0052)(55) 52640666

velasco203@hotmail.com

Formación Profesional

- 2007 -** Arquitecto con énfasis en paisajismo
Fundación Universitaria de Popayán (FUP)
Popayán – Colombia.
- 2011 -** Especialización en Diseño Bioclimático
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM - A)
México.
- 2012 -** Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo
Línea de investigación: Arquitectura social y sustentabilidad.
Instituto Politécnico Nacional (IPN – ESIA)
México.

Otros Estudios Profesionales

2007 - Diplomado: **Plan de ordenamiento Territorial (POT)**

Fundación Universitaria de Popayán
Popayán – Colombia.

- | | |
|--|--|
| <p>2012 - Diseño y evaluación de edificios sustentables
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad de Barcelona, LAHAS URGE Mexico.</p> | <p>2010- Coloquio Interno de Investigación del Programa de Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo
Instituto Politécnico Nacional (IPN)
México.</p> |
| <p>2012 - Seminario Internacional de Urbanismo y Edificación Sustentable
Universidad Nacional Autónoma de México.
Instituto de Ingeniería de la UNAM
México.</p> | <p>2010 - XXXIV Semana Nacional de Energía Solar
Semana Nacional de Energía Solar (ANES)
Universidad de Guanajuato
México.</p> |
| <p>2011 - Seminario Habilidad Sustentable en Diferentes Ámbitos del Mundo
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
México.</p> | <p>2010 - Foro Internacional de Multiculturalidad
Universidad de Guanajuato
México.</p> |
| <p>2011 - Seminario Internacional de Iluminación
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
México.</p> | <p>2010 - Arquitectura Vernácula de Jerusalén.
Comité Nacional Mexicano del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS)</p> |
| <p>2011 - Segundo Coloquio de Investigación del Programa de Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo
Instituto Politécnico Nacional (IPN)
México</p> | <p>2010 Foro Internacional de Diseño Sustentable en las Economías Emergentes
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
México</p> |

Seminarios y cursos de formacion profesional

Experiencia Laboral

- | | |
|--|---|
| <p>2013 - 2012 Consultor, Valuador y Diseñador.
CENIT ARQUITECTOS
Consultoría, evaluación y diseño bioclimático
www.cenitarquitectos.com
Cenitarquitectos.com
Tel: (00571)(55)53473511
México.</p> | <p>2008 - Residente de obra
MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL
Adecuación, remodelación de las oficinas del ministerio.
Contrato: 390 del 2008 del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial
Bogota - Colombia</p> |
| <p>2010 - Jefe de diseño
SOLUCIONES INTEGRALES E INGENIERÍA
Diseño, construcción y remodelación de obras civiles y arquitectónicas.
solintegrales@hotmail.com
(00571)(0928)239258
Popayán - Colombia</p> | <p>2007 - Residente de obra
GEOCIVILES
Construcción del centro de salud de Coconuco, municipio de Purace, departamento del Cauca, Colombia
Contrato de Obra: 972 - 2007
(00571)314 724 52 79 –
(00571) 316 624 07 05</p> |
| <p>2009 - Director de obra
GEOCIVILES
Construcción de seis aulas para ampliacion de cobertura en las instituciones educativas Simon Bolivar, oasis y santa Elena del municipio de Piendamó.
Contrato de Obra: CC4 – 047
Colombia
Tel: (00571)314 724 52 79 –
(00571) 316 624 07 05</p> | <p>2007 - Residente de obra
GEOCIVILES
Construcción del centro de salud coconuco – municipio de Purace departamento del Cauca, Colombia.
Contrato de Obra: 973 – 2007.
Tel: (00571)314 724 52 79 –
(00571) 316 624 07 05</p> |

Ponencias y Publicaciones

- | | |
|---|---|
| <p>2012 - Eficiencia, accesibilidad y componentes de los sistemas de enfriamiento natural en regiones cálidas húmedas. Revista ARCUS. Arquitectura, construcción y urbanismo sostenible. ISSN 2256-1390
Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca Colombia.</p> | <p>2012 - Evaluación de dos sistemas de iluminación de alta eficiencia en un edificio de oficinas. Tercer foro internacional de Multiculturalidad. Instituto Politécnico Nacional, Universidad de Guanajuato, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Metropolitana, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Universidad Autónoma de Chapingo. México.</p> |
| <p>2012 - Técnica experimental de visualización para estudios aerodinámicos de envolventes arquitectónicas XXXVI Semana Nacional de Energía Solar Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) Cuernavaca, Morelos. México.</p> | <p>2011 - Herramientas de Diseño Arquitectónico Bioclimático. Segundo Coloquio de Investigación del Programa de Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo. Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura Tecamachalco – (ESIA). México, Distrito Federal.</p> |
| <p>2012 - Estudio de estrategias pasivas de ventilación basadas en un análisis numérico. Tercer foro internacional de multiculturalidad Instituto Politécnico Nacional. Universidad de Guanajuato. México, Distrito Federal.</p> | <p>2010- Ventilación Natural en Edificaciones. Primer Coloquio de Investigación del Programa de Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo. Instituto Politécnico Nacional (IPN)</p> |

Escuela superior de
Ingeniería y Arquitectura
Tecamachalco – (ESIA).
México, Distrito Federal.
2010.

ANEXOS



El Instituto Politécnico Nacional sede del
3^{er} Foro Internacional de Multiculturalidad
Crisis, Conflicto y Negociación en el marco de la interculturalidad.
Otorga el presente Reconocimiento a:

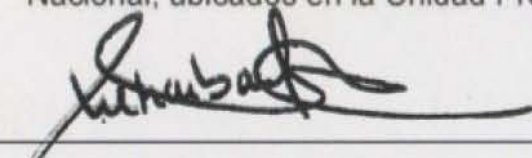
Velasco Sandoval Alberth Fabian

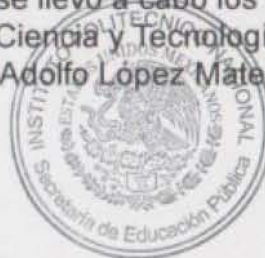
Por su distinguida participación como:

Ponente de la Conferencia:


**“Estudio de estrategias pasivas de ventilación basadas en un análisis numérico.
Análisis de estrategias pasivas de ventilación basadas en un análisis numérico de
dinámica de fluidos computacional**

En el 3^{er} Foro Internacional de Multiculturalidad que se llevó a cabo los días 22, 23 y 24 de Agosto, en el Centro Cultural “Jaime Torres Bodet” y La Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología “Víctor Bravo Ahuja” del Instituto Politécnico Nacional, ubicados en la Unidad Profesional “Adolfo López Mateos” en Zacatenco, Ciudad de México, D.F.


M. en C. Humberto Federico Chehaibar Arroyo
Director de la ESIA Tecamachalco, IPN



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA TECAMACHALCO
DIRECCIÓN


Dr. Ricardo Antonio Tena Núñez
Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
ESIA Tecamachalco, IPN
Coordinador General 3FIM



Título y subtítulo de la ponencia (máximo 25 palabras)

Título: Estudio de estrategias pasivas de ventilación basadas en un análisis numérico
Subtítulo: Análisis de estrategias pasivas de ventilación basadas en un análisis numérico de dinámica de fluidos computacional

Palabras clave:

Simulación numérica

Aerodinámica

Estrategias pasivas

Resumen (máximo 250 palabras):

El hombre ha buscado la manera de aprovechar los recursos de la naturaleza para transformarlos en energía y de esta manera facilitar sus labores. Actualmente los recursos no renovables como el petróleo, el carbón y el gas natural se están agotando aceleradamente. Para suplirlas, se exploran nuevas fuentes de energía limpias como la mareomotriz, la geotérmica y la eólica. Para llevar a cabo una investigación de la aerodinámica de una edificación, se pueden emplear simulaciones numéricas en donde se utiliza un software comercial de dinámica de fluidos computacional.

La presente investigación se desarrolló a través de simulaciones numéricas de la incidencia del viento sobre el volumen de una edificación, la cual está implantada en un área donde las edificaciones cercanas tienen una relación de alturas de 1:2, 2:1 y 3:1 con respecto al caso de estudio. Se analizó la incidencia e interacción del viento sobre las edificaciones vecinas así como sobre el volumen del caso de estudio.

Con base a los resultados del análisis del flujo, se pudo concluir que la energía cinética del viento se puede aprovechar en dispositivos bioclimáticos y en estrategias pasivas de ventilación, con las cuales, se generarán condiciones de confort y se reducirán los equipos mecánicos y eléctricos altamente consumidores de combustibles fósiles.

Enviar a: fimulticulturalidad@hotmail.com (confirmar recepción)

ABSTRACT

Man has sought different ways to harness the natural resources as agent of change in energy and thus facilitates their work. The non-renewable resources such as oil, coal and natural gas are being depleted rapidly. So it is necessary to explore new clean energy sources like solar, tidal, wind and nuclear. In this work we propose an aerodynamic research based on numerical simulations. The simulations were performed using a numerical model. The equations of motion of fluids were solved on Computational Fluid Dynamics (CFD) technique software based on finite volume method. This paper presents the aerodynamic behavior of the surrounding air at conglomerate of buildings. In order to promote natural ventilation within the architectural space, the kinetic energy of the air flow generated in some regions of the volume was used.

The research was developed through numerical simulations based on the impact of the air on the horizontal building volume, which is implanted in the area where the surrounding building are in 1:2, 2:1 and 3:1 ratios as a case study reference height. Also it was analyzed the impact and interaction of the air above the neighboring buildings to influence the horizontal volume. The total number of numerical simulations were performed using the CFD technique. The numerical results were previously validated.

Based on the flow analysis results, we can conclude that the kinetic energy of the air can be used in bioclimatic devices and passive ventilation strategies also generate comfort conditions. The highly demand of fossil fuels and energy is possible if the mechanical and electrical equipment is reduced.

INTRODUCCIÓN

Las grandes ciudades del mundo, denominadas ahora “megapolis” son el producto de la transformación y la concentración geográfica de centros de la política, la economía y la historia. Este término fue introducido por el geógrafo Jean Gottmann en 1961 en donde se considera un crecimiento urbano considerable, favorecido por los nuevos medios de comunicación y de transporte (Gottmann, 1961). Estas grandes

extensiones urbanas fueron consideradas una característica de los países desarrollados, particularmente de los Estados Unidos, Japón y Europa Occidental.

En la actualidad, las 25 ciudades más pobladas del mundo tienen al menos 8.5 millones de habitantes cada una y cerca de la mitad de estas ciudades se encuentran en países en vías de desarrollo. Nuestro país tiene una posición en esta lista, siendo la Ciudad de México la quinta mayor habitada, con un total de 17.5 millones (Unidas, 2010).

En el documento de Naciones Unidas titulado Estado de la población mundial 2010, se utilizan como indicadores demográficos, sociales y económicos 13 variables para evaluar a las ciudades. Una de estas variables es el consumo de energía per cápita. Este indicador también puede ser utilizado para medir el desarrollo económico y social de un país. Sin embargo el presente trabajo retoma la información reportada en (Unidas, 2010) con el objetivo de reconocer la importancia de implementar metodologías de construcción enfocadas a la utilización de energías limpias y minimizar el impacto al medio ambiente (Díaz-Martínez et al., 2011, Salas, 2008).

Las metodologías propuestas en esta investigación tienen como propósito cuantificar la habitabilidad de un espacio arquitectónico. Esto se logrará a través de la estimación de los campos de velocidad del viento en dicho espacio. Estas estimaciones se traducirán en mediciones de confort y se evaluarán criterios de diseño bioclimáticos aplicados a una edificación (Salas, 2008).

Otros elementos a considerar son el confort acústico y visual, entre otros. Los criterios antes mencionados son una muestra de los elementos que deben tomarse en cuenta en las etapas de planeación del diseño en un espacio arquitectónico con el fin de mejorar la calidad de vida de los usuarios y el entorno.

En este trabajo se presenta la técnica de modelado numérico previamente validada con la experimentación física de los modelos a escala dentro de un túnel aerodinámico de baja velocidad y de circuito abierto localizado en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, para evaluar el comportamiento del aire en una distribución de edificaciones localizada en la región poniente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en donde se utilizan criterios de diseño bioclimático.

Finalmente se propondrá la implementación de elementos pasivos como estrategia de diseño y ahorro energético (Velázquez Soto, 2012).

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En una de las zonas con mayor actividad económica y con un gran número de construcciones, monumentos y mobiliario, todos ellos representativos de la cultura mesoamericana, se encuentran localizados un conjunto de estructuras arquitectónicas llamados “rascacielos”, que afectan notablemente la topología de la zona. Estas edificaciones son utilizadas como oficinas y hoteles y dan forma a centros financieros en todo el país. Estas zonas no solamente tienen una relevancia económica, también relevancia cultural y social. Para este trabajo se propone realizar un análisis aerodinámico y utilizar los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas como herramientas de diseño para la implementación de tecnología de ahorro energético y bioclimático.

El impacto que tiene la implementación de tecnologías para disminuyan el deterioro del medio ambiente pueden aportar distinción a la ciudad y traer como consecuencia la reproducción de estas tecnologías hacia algunas de las zonas donde se encuentran los corporativos más importantes del interior de la República.

Aún cuando la industria de la construcción de rascacielos no es amplia en nuestro país, el análisis aerodinámico de este tipo de casos de estudio será de utilidad para conocer los efectos que un edificio elevado construido en una zona densamente poblada tiene sobre su entorno cercano. Esta edificación de 150 metros de altura aproximadamente se encuentra localizada en la zona centro de la Ciudad de México.

En una de las principales avenidas de la ciudad, el tránsito de vehículos es considerablemente mayor que en otro tipo de avenidas y la velocidad promedio de los vehículos es de $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, además se toma en cuenta un régimen de trabajo normal sin afectaciones a la circulación relevante y en el tránsito de personas.

Actualmente, la distribución de los edificios alrededor de esta edificación es como se muestra en la Figura 1. El edificio en color rojo será el caso de estudio. La propuesta de

la edificación se hizo para un caso de estudio que es afectado por la interacción con un edificio elevado.

La información que se obtuvo de los planos del proyecto de construcción nos permitió realizar un modelo numérico con la representación de las edificaciones más apreciables de los alrededores de la propuesta y la edificación elevada y se presenta a continuación en la Figura 1.

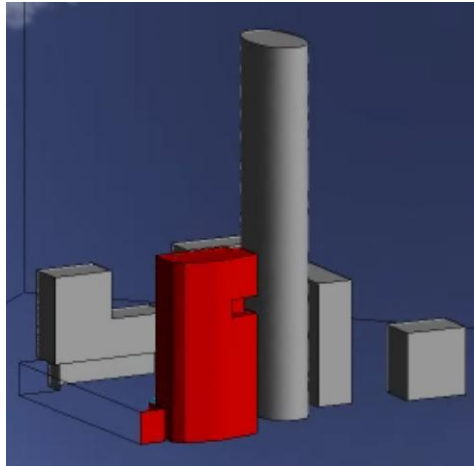


Figura 1 Modelo numérico de la distribución de un conjunto de edificaciones en un centro financiero de la Ciudad de México.

La topología de los modelos físicos y numéricos se simplificó de manera que el efecto de la calidad superficial debido a los materiales no afectara al método de discretización. Se obtiene además una ventaja considerable al no aumentar innecesariamente el número de elementos en los alrededores inmediatos a las edificaciones. En este trabajo se pretende determinar el efecto del viento sobre las superficies en donde el viento dominante impacta debido a su dirección. También se pretende observar la generación y la evolución de los vórtices debido a la interacción del viento con las diferentes edificaciones.

DESARROLLO TEMÁTICO

Consideraciones del modelo físico

Para dimensionar esta región se tomó como referencia las calles aledañas a dos edificaciones, el caso de estudio y el rascacielos.

En primer lugar se estableció el dimensionamiento del volumen de control, que consiste en la volumetría de las edificaciones y los alrededores del edificio a evaluar aerodinámicamente.

Después de evaluar las diferentes edificaciones de la zona, se decidió modelar al menos un edificio en las cuadras contiguas al caso de estudio. El criterio para seleccionarlos fue tomar en cuenta las dimensiones o la superficie que ocupan así como la altura.

Modelado numérico

El modelado numérico requiere en su primera etapa la generación de un modelo sin escalar, tridimensional y con la precisión necesaria para que las topologías puedan representar adecuadamente el fenómeno del movimiento del viento en los alrededores de las edificaciones. Para el modelo numérico que se presentó en la Figura 3, se observa que cuenta con los detalles necesarios de la envolvente de cada edificación. El modelo tiene también las edificaciones representativas en dos cuadras alrededor del caso de estudio.

Posteriormente es necesario realizar la discretización del modelo. En esta etapa el continuo se divide en elementos finitos. El número de volúmenes utilizados es directamente proporcional al grado de precisión que se desea alcanzar con el modelo numérico. En esta etapa se establecen los valores para los parámetros requeridos en la etapa de solución de las ecuaciones de movimiento de los fluidos (Ansys, 2009).

Es necesario considerar que el número de elementos que se obtienen en la discretización depende también del volumen más pequeño del sistema, del factor de crecimiento y del grado de deformación de los elementos. Con base en esta información a continuación se detallan las características de la discretización del modelo numérico.

El número total de elementos cúbicos fue de aproximadamente 1.9 millones de elementos. La zona de las edificaciones se utilizó como referencia para determinar el tamaño de los elementos. Se utilizó un valor constante de 1.2 para el factor de crecimiento. El tamaño del mayor de los elementos fue dos veces el volumen más

pequeño de la malla. Se utilizaron dos criterios para determinar la deformación de los elementos, la aproximación al volumen y la deformación de los elementos. Esto se hizo para minimizar la posibilidad de divergencia del método debido a la topología de la malla.

Para determinar las dimensiones del volumen de control se utilizó la relación entre la escala de los modelos físicos y el tamaño de la zona de pruebas del túnel de viento que se usó para hacer las simulaciones físicas. Con esto estamos en posibilidad de llevar a cabo una comparación directa para hacer una validación de los resultados numéricos.

Para caracterizar el comportamiento del viento en el volumen de control es necesario resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos y la ecuación de continuidad. Para resolver numéricamente el sistema de ecuaciones, en este trabajo se utilizó un software basado en la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Una característica de la técnica de CFD es que permite resolver las ecuaciones de movimiento de los fluidos para un sistema tridimensional. Es importante señalar que en el modelo numérico no se utilizó ningún eje de simetría o simplificación del volumen de control que pudieran afectar los resultados en la simulación numérica.

Resumiendo, la solución del modelo numérico implica resolver las ecuaciones de conservación de masa así como las ecuaciones del movimiento de los fluidos, conocidas como ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes respectivamente. Para ello se utilizó un software comercial basado en el método de volumen finito (Ansys, 2009).

La ecuación de continuidad en su forma diferencial se presenta a continuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo y \vec{V} es la velocidad del fluido. Cuando se resuelve esta ecuación, es necesario establecer si el flujo es incompresible ya que si la densidad es constante, el primer término se vuelve cero.

En el caso de las ecuaciones de Navier-Stokes se definió que el fluido de trabajo es viscoso e incompresible. Por lo tanto a continuación se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo viscoso e incompresible:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \quad \text{Ec. (4)}$$

RESULTADOS

Como se muestra en las Figuras 2 a 5, los vectores de velocidad se utilizan no solamente para mostrar la magnitud de velocidad en diferentes zonas del modelo, también es posible identificar la formación y la evolución de los vórtices, los cuales se pueden observar en los alrededores del modelo numérico.

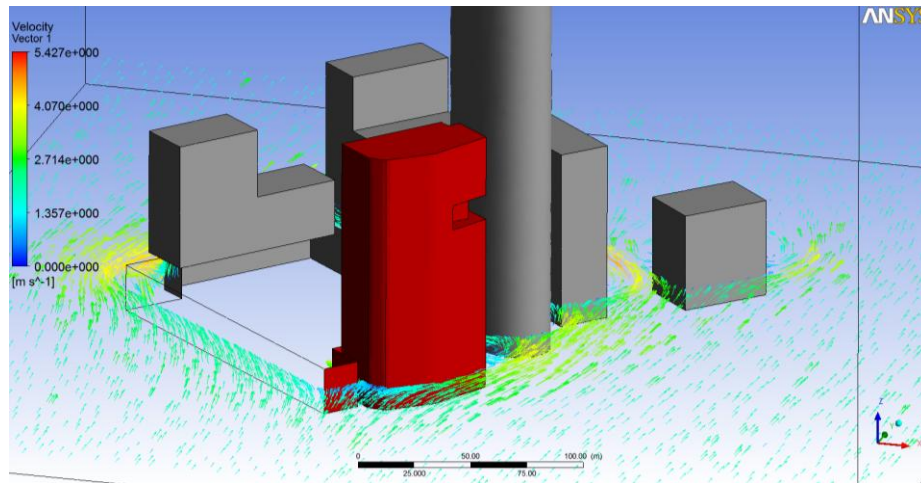


Figura 2 Vectores de velocidad en un plano horizontal a 2 metros por encima del nivel de la calle

Las regiones de flujo con recirculación se localizan generalmente en las paredes posteriores de las edificaciones. Para mejorar la visualización, se colocaron en tonos de gris todos los edificios vecinos a la edificación que se estudia, la cual tiene color rojo. También se utilizaron tonos de grises para el conjunto de edificaciones que se localizan enfrente de edificación de interés. El edificio en donde el viento impacta de

manera frontal en primera instancia no tiene color, esto la finalidad de obtener una mejor visualización.

En la Figura 2 se muestran los resultados de una simulación numérica mediante una vista isométrica, cuya orientación coincide con la dirección del viento dominante, la cual apunta hacia adentro de la figura. Se muestran los vectores sobre un plano a cuatro metros de altura. Los vectores de velocidad muestran el comportamiento del viento en la avenida. Los efectos hacia peatones que transitan por la zona se observan con mucha claridad.

Para la simulación mostrada en la Figura 2, la condición de frontera fue que la magnitud de la velocidad del viento fuese de $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y que la dirección dominante es NE.

En la Figura 3 se muestran los resultados para la misma simulación que en la Figura 2, pero ahora a través de una vista por la parte superior. En esta figura se observa que el viento experimenta una disminución en la magnitud de su velocidad cuando impacta a la volumetría de las edificaciones. Una de las edificaciones adyacentes al de interés funciona como barrera, desviando gran cantidad del viento en dirección norte. Una parte del flujo pasa por el intersticio que se forma entre los dos primeros edificios y se forma una zona de recirculación de baja velocidad, con una velocidad promedio de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Existen dos regiones cercanas a la edificación de interés en donde el flujo incrementa su magnitud de velocidad en tres veces aproximadamente. La primera región contigua o llamada también intersticio. La segunda región es en donde se localiza la avenida y en ésta, el viento principalmente se dirige hacia el rascacielos.

El edificio adyacente a la edificación de interés estabiliza la velocidad del viento. Sin embargo, induce un cambio considerable en su dirección.

Después de chocar con la edificación de interés, la corriente de viento se divide en tres partes. La primera corriente cambia su dirección hacia el norte y rodea la pared frontal del edificio adyacente al de interés. El flujo del viento se despega y se acelera cuando termina la pared del edificio.

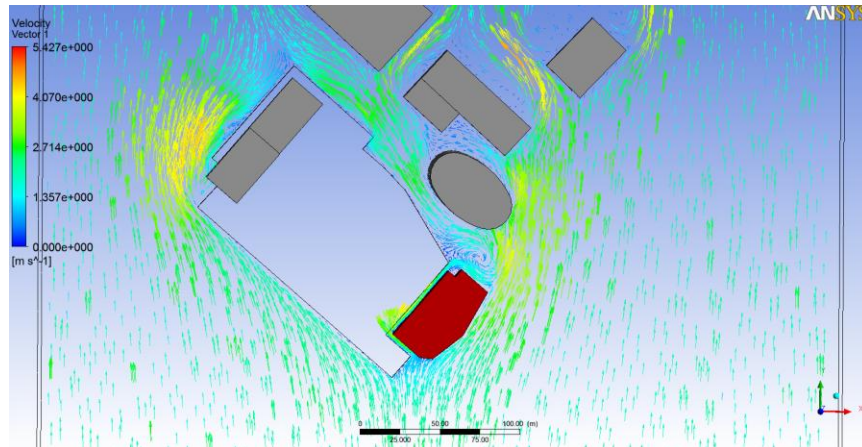


Figura 3 Vista superior donde se muestran los vectores de velocidad en un plano horizontal a 4 metros del nivel de la calle

En la segunda región, el intersticio, el viento se acelera, aunque disminuye rápidamente su velocidad. Primero existe una disminución del área transversal y el aire no choca directamente con las paredes de los edificios que crean el intersticio. A partir de los resultados, se presume que el viento pierde rápidamente su energía cinética debido a la interacción con las paredes de los edificios y a que cambia su dirección.

La tercera región es la cara del edificio de interés que está orientada con respecto a la avenida. El viento que circula por esta pared se acelera rápidamente y favorece la formación de una zona de recirculación en la explanada que se forma entre el rascacielos y la edificación de estudio.

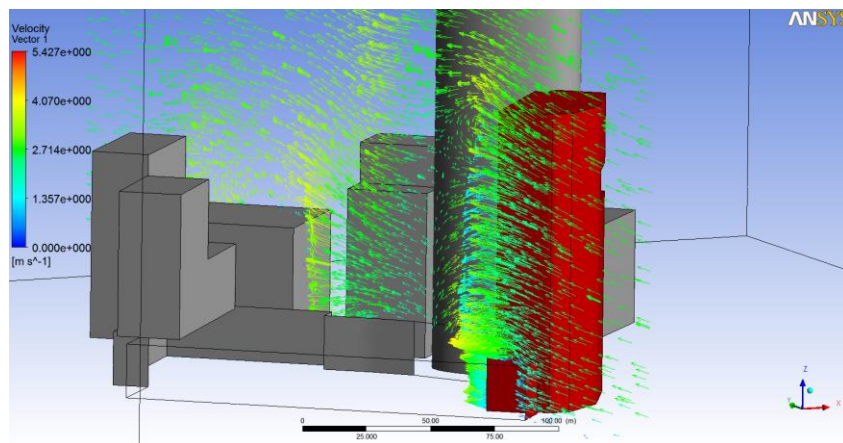


Figura 4 Vista isométrica donde se muestra los vectores de velocidad en un plano.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento del aire en un plano vertical en la región central del volumen de control. El efecto que el rascacielos tiene sobre el patrón de flujo de la propuesta de edificación es muy relevante, ya que, aparentemente, la dirección del viento únicamente se modifica por la presencia del rascacielos. En la región donde se encuentra el caso de estudio, el flujo se divide en dos, un flujo descendente que se extiende en casi toda la altura del volumen del caso y, otra corriente que tiene una dirección ascendente por encima de la volumetría.

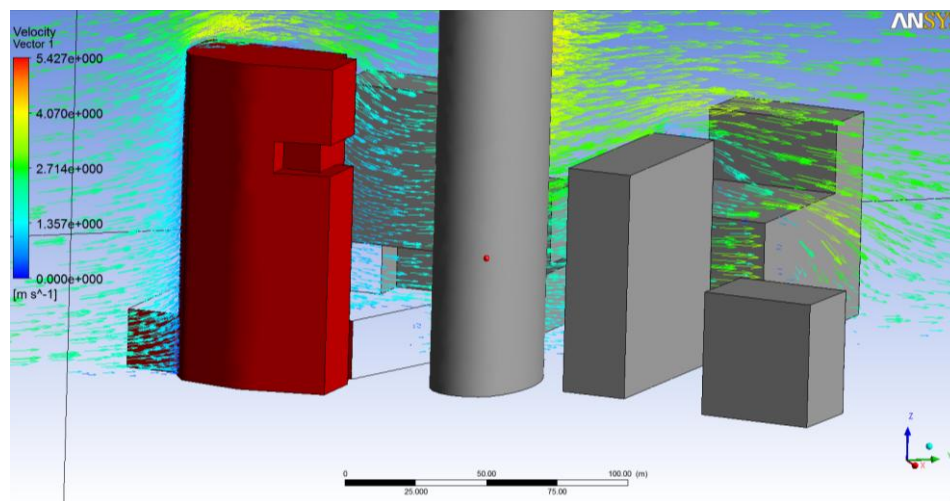


Figura 5 Vista lateral izquierda que presenta los vectores de velocidad en un plano vertical en un eje central a 2 metros hacia la izquierda.

La Figura 5 muestra un plano paralelo al presentado en la Figura 4. Se muestra que el flujo choca con una de las paredes laterales de la edificación bajo estudio. En esta zona el viento tiene una dirección ascendente debido a que el viento interactúa con la pared y la magnitud de la velocidad influye para que se pueda pegar a la pared de la edificación y posteriormente pasar hacia la cubierta superior. Una vez en la cubierta superior, el viento se despega de la pared lateral, cambia su dirección y forma una segunda región donde se forma una zona de recirculación del viento.

Debido al cambio en la dirección, una parte del flujo ascendente influye sobre la dirección dominante del viento y una vez que pasa a lo largo de la edificación bajo estudio tiene una dirección descendente. La trayectoria del viento en esta región forma una parábola este comportamiento se da debido a la interacción con la corriente de

viento dominante y la interacción con las paredes. Por debajo de esta trayectoria parabólica se forma una zona de alta turbulencia.

El comportamiento del viento alrededor de todo la edificación de estudio es prácticamente esperada, sin embargo conforme se va alejando de la edificación en estudio incrementa su magnitud y al pasar por el modelo de la edificación elevada obtiene su máxima velocidad, alcanzando aproximadamente $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Posteriormente continúa se incrementa nuevamente la turbulencia y se observa una trayectoria desordenada hacia las edificaciones que se encuentran en la pared posterior al rascacielos y así sucesivamente. Este comportamiento puede entenderse como la formación de una corriente que cambia su dirección debido a la incidencia del viento con respecto al rascacielos sin ser afectado notoriamente por el resto de las edificaciones.

El viento que se observa se forma por encima de la cubierta superior del caso de estudio es turbulenta y está delimitado por la dirección del viento que se alinea a las paredes laterales del rascacielos. La zona de influencia del viento y la zona de recirculación está determinada por la formación de una trayectoria parabólica como se mencionó anteriormente. Existe un propuesta en la que se evalúa la construcción de una superficie para el aterrizaje y despegue de helicópteros, sin embargo de acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas es necesario tomar en cuenta que la dirección del viento y la formación de las diferentes zonas de recirculación están determinadas por la interacción del viento con la edificación elevada.

La influencia que el edificio elevado o rascacielos tiene sobre la distribución de la velocidad en su alrededor es relevante y consideramos que no existan elementos que logren disipar esta turbulencia por lo que no se generan las condiciones óptimas para la operación segura de un helipuerto.

CONCLUSIONES

La turbulencia que se genera en los alrededores del edificio elevado que se encuentra junto a la edificación de estudio afecta a las condiciones con que el viento interactúa

con las paredes laterales del edificio. Se han presentado diferentes resultados de las simulaciones donde es posible el empleo de elementos pasivos para la generación de un sistema confiable de ventilación basado en la convección natural dentro de los espacios habitables y de trabajo en la edificación de estudio.

El comportamiento del flujo de aire en los alrededores de la edificación en estudio permiten identificar las zonas más apropiadas en donde las entradas de aire de un sistema de ventilación basado en la convección natural tendrían un mejor aprovechamiento para obtener la mayor energía cinética del viento y es posible considerar la disminución y posiblemente la eliminación de sistemas de aire acondicionado que utilizan energía de fuentes de energía convencionales y garantizar un considerable ahorro energético.

Una vez identificados los distintos fenómenos del movimiento del aire con las herramientas de visualización utilizadas en este trabajo tales como vectores de velocidad y líneas de flujo para la interpretación de los resultados de las simulaciones numéricas es posible identificar las zonas en donde se forman vórtices, zonas de estancamiento, turbulencia y los cambios en la dirección del viento debido a la interacción del aire con las edificaciones.

El desempeño aerodinámico de la edificación es un análisis que ofrece la posibilidad de llevar a cabo propuestas de diseño bioclimático basado en criterios energéticos que ayudan a mejorar el bienestar térmico y sanitario de los usuarios. Para ello se aprovechan las características geométricas de los alrededores y la envolvente de una edificación para introducir el flujo de aire al interior de las edificaciones y regular la entrada de este viento para obtener las condiciones de confort.

En este estudio se presentó las etapas iniciales de la etapa de diseño para comprender el comportamiento del viento sin considerar aún los elementos del interior de una edificación cercana a un rascacielos. En una próxima etapa se realizarán diferentes propuestas de distribución de elementos pasivos para optimizar la energía cinética del viento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido para la realización de los experimentos físicos a los Departamentos de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, al Departamento de Materiales y al Departamento de Sistemas de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

REFERENCIAS

ANSYS 2009. Ansys Fluent Theory Guide.

DIAZ-MARTINEZ, A., DIAZ-MARTINEZ, L. R., RODRIGUEZ-MACHAIN, A. C., DIAZ-ANZALDUA, A., VARELA, H. F. & HERNANDEZ-AVILA, C. A. 2011. Efficacy of a therapeutic intervention program among Mexican college students diagnosed with alcohol dependence. *Salud Mental*, 34, 185-194.

GOTTMANN, J. 1961. *Megalopolis: The Urbanized Northeastern Seaboard of the United States*, New York, The Twentieth Century Fund.

SALAS, J. 2008. Risk assesment of socio-natural disasters in Central America and the Caribbean. *Open House International*, 33, 8-21.

UNIDAS, N. 2010. *Estado de la Población Mundial 2010 Desde conflictos y crisis hacia la renovación: generaciones de cambio*. In: EXTERNAS, D. D. I. Y. R. (ed.). New York: División de Información y Relaciones Externas del UNFPA.

VELÁZQUEZ SOTO, J. M. 2012. *Análisis físico y numérico del comportamiento del flujo de aire de un edificio*. Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana.



XXXVI Semana Nacional de Energía Solar
"Energía Sostenible para Todos"

La Asociación Nacional de Energía Solar, A. C.
Otorga el presente

Reconocimiento

a:

*Alberth Fabian Velasco Sandoval, Verónica Huerta Velázquez,
Jesús I. González Trejo, Rosalba Orduña Martínez, Francisco
Cervantes de la Torre y César Augusto Real Ramírez*

Por la presentación del trabajo:
TÉCNICA EXPERIMENTAL DE VISUALIZACIÓN PARA
ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE ENVOLVENTES
ARQUITECTÓNICAS

A stylized, handwritten signature in dark ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke.

Vicente Estrada-Cajigal Ramírez
Presidente del XVI Consejo Directivo
Octubre de 2012



TÉCNICA EXPERIMENTAL DE VISUALIZACIÓN PARA ESTUDIOS AERODINÁMICOS DE ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS

Alberth Fabian Velasco Sandoval, Verónica Huerta Velázquez

División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, San Pablo 180, México, Distrito Federal, 02200, México, 53189000, 53944534, velasco203@hotmail.com, vhv@correo.azc.uam.mx

Jesús I. González-Trejo, Rosalba Orduña Martínez, Francisco Cervantes de la Torre, César Augusto Real-Ramírez

División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, San Pablo 180, México, Distrito Federal, 02200, México, 53189016, 53944534, carr@correo.azc.uam.mx, ord.rosal@gmail.com, gtji@correo.azc.uam.mx

RESUMEN

El aire es un elemento indispensable para las actividades humanas y está presente en todos los lugares aún cuando es imperceptible. El ser humano requiere ver el aire para interpretar como interactúa con los diferentes espacios y de esta forma utilizarlo como medio de trabajo. El estudio del aire es complejo ya que el flujo continuamente cambia de dirección de forma abrupta. La mayor parte de las investigaciones que se han estudiado la incidencia del aire sobre las envolventes de edificaciones arquitectónicas lo hacen de manera bidimensional. Existen también una serie de técnicas tridimensionales para el análisis de flujos, pero dichas técnicas no están enfocadas hacia las edificaciones arquitectónicas.

En este trabajo se presenta una técnica tridimensional para analizar la incidencia del aire sobre las envolventes de un conjunto de prototipos de edificaciones arquitectónicas. Esta es una técnica experimental de visualización y análisis aerodinámico para edificaciones arquitectónicas desarrollada para un túnel de viento de baja velocidad, como el que se encuentra en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Este trabajo describe de forma detallada, las características principales de la técnica y la forma en que se deben de analizar los resultados de las visualizaciones.

ABSTRACT

The air is an essential element for human activities and is present in all places even though it is imperceptible. Human beings interact in different spaces and thus used air as a medium. The aerodynamics need to consider the non-steady nature of the flow. Several researches have studied the interaction between air and architectural buildings envelope in two-dimensional analyses. There are several techniques to analyze the three-dimensional behavior of a single-phase flow, but such techniques are not focused on architectural buildings.

This paper presents a three-dimensional technique in order to analyze the effect of the surrounding air of a set of architectural prototypes. Also presents an experimental aerodynamic analysis and visualization results in a low-speed wind tunnel facility. The wind tunnel is located in Universidad Autonoma Metropolitana Azcapotzalco. This work also describes the main features of the technique and the analysis of the results.

INTRODUCCIÓN

Un túnel aerodinámico es una herramienta especializada para propósitos especializados. En la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco cuenta con un laboratorio dedicado al estudio del viento en condiciones controladas a través de un túnel aerodinámico de baja velocidad y circuito abierto. El propósito de este túnel es habilitar a la comunidad para conocer el comportamiento del aire y su interacción con modelos a escala de las propuestas de vivienda que se desarrollan en el plan de estudios de las carreras de la División de Ciencias y Artes para el Diseño.

Debido a la necesidad de tener especialistas en las áreas de conocimiento de la Ingeniería, se ha planteado una colaboración para incrementar las capacidades técnicas de la comunidad. De esta fructífera colaboración se presenta una técnica novedosa de visualización experimental basada en la iluminación focalizada en un modelo de vivienda. El objetivo es iluminar mediante un plano los alrededores de una vivienda. La intensidad luminosa se gradúa a fin de mejorar la visualización sin generar deslumbramientos. Existen diferentes técnicas para iluminar una zona de pruebas de una instalación como el túnel aerodinámico, sin embargo el costo de esta propuesta es bajo y una característica es la portabilidad de sus elementos para adaptarse a diferentes zonas.

La técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) se basa en tecnología de punta y como elemento de iluminación se utiliza comúnmente una fuente laser cuyo valor es elevado y las condiciones de operación requieren estándares de seguridad elevados por la radiación y energía que es posible obtener de esta infraestructura (Sun and Zhang, 2007, Upp, 2002, Kang and Lee, 2008).

La técnica de iluminación por chispa es una tecnología basada en elementos costosos cuya aplicación está relacionada en la visualización de fenómenos de combustión y análisis de flujo en spray para distinguir las sombras que se generan debido a la alta intensidad luminosa que se desprende de la fuente (Volpe and Settles, 2006, Forbes and Brackett, 1931).

Consideramos que una instalación con técnicas de alta sofisticación no se requiere debido a que es posible generar condiciones de iluminación necesarias para ver la interacción del aire con las paredes de una vivienda dentro de un túnel aerodinámico. A lo largo del trabajo se presentarán las consideraciones de la intensidad luminosa de la fuente y el empleo de elementos para modificar la salida de la energía hacia el

modelo de forma controlada y obtener resultados con alta intensidad luminosa sin afectar la aerodinámica ni el experimento físico.

En este trabajo se utiliza una técnica experimental basada en una fuente de energía luminosa para la visualización de la interacción del viento con un prototipo a escala del modelo de vivienda típico para el área metropolitana de la Ciudad de México.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

El túnel aerodinámico localizado en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco se encuentra en el Laboratorio de Diseño Bioclimático del Departamento de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el Diseño. Cuenta con una campana de 4 metros cuadrados de área de entrada y mediante una curva de segundo grado disminuye el área transversal a 1.1 metros cuadrados para pasar posteriormente a una área donde se localizan tubos enderezados de aire para homogenizar el perfil de velocidad a la zona de pruebas, la longitud de la zona de enderezadores es de un metro y previo a la zona de pruebas se encuentra una zona de dos metros de largo donde el flujo se desarrolla. A continuación se encuentra la zona de pruebas con una longitud de tres metros de largo y tres compuertas, dos laterales y una superior para la instalación de los prototipos físicos a escala así como diferentes instrumentos y accesorios en su mayoría desarrollados en la Universidad Autónoma Metropolitana.

El túnel aerodinámico cuenta con un variador de velocidad para controlar cuatro ventiladores de dos caballos de fuerza que permiten generar un perfil uniforme de velocidad en la zona de pruebas de hasta $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Existen múltiples trabajos de investigación en donde se ha utilizado esta valiosa herramienta de diseño, sin embargo en esta ocasión se destaca el trabajo de Fernández Meza en donde se realizó la caracterización del túnel de viento como herramienta alta precisión para la medición de la velocidad del aire (Meza, 2008).

El trabajo de Meza tuvo como objetivo el establecer las condiciones de operación con seguridad y estableció una metodología con criterios específicos para el desarrollo de un experimento en el túnel. Esta metodología permitió desarrollar los perfiles de velocidad a diferentes frecuencias, así como responder a las características fundamentales de construcción y operación del túnel aerodinámico.

Posteriormente, en el trabajo de Velázquez Soto, se presentó una metodología de análisis de los resultados que se obtienen al utilizar una herramienta como el túnel aerodinámico para la visualización de fenómenos dentro de la zona de pruebas y la medición de variables fundamentales con instrumentos calibrados para evaluar la aerodinámica de modelos arquitectónicos (Velázquez Soto, 2012).

A continuación se presenta una fotografía del sistema ya instalado en el túnel aerodinámico:

Con la información obtenida de los estudios antes mencionados, producto del trabajo en equipo por parte de integrantes de dos Instituciones, el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Autónoma Metropolitana se presenta una novedosa técnica de visualización basada en una herramienta de precisión como es el túnel aerodinámico de baja velocidad, caracterizado para evaluar diferentes modelos arquitectónicos a escala, una máquina

generadora de humo y un sistema de iluminación para la visualización de modelos a escala.

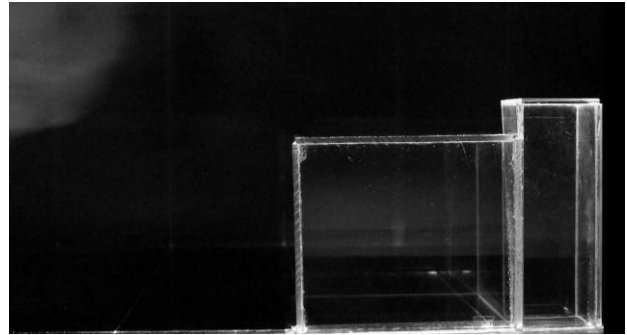


Figura 1 Vista lateral del modelo de vivienda, la dirección del viento es de izquierda a derecha.

En la Figura 1 se presenta la vista lateral de un modelo físico de vivienda instalado sobre una base giratoria para cambiar la orientación de la vivienda con respecto a la dirección del flujo la cual es determinada por el túnel aerodinámico.

En esta figura se muestra también una serie de líneas transversales a la dirección del flujo, donde es posible determinar zonas de análisis y la relación que guarda un fenómeno con respecto a las dimensiones geométricas del modelo. La longitud de la casa determina las líneas perpendiculares a la dirección del flujo. Por lo que a lo largo de la siguiente sección se mencionarán el desarrollo de los fenómenos en términos de las relaciones adimensionales de la vivienda y los criterios de similitud geométrica y dinámica.

También se utilizaron marcas, que proyectan líneas paralelas a la dirección del flujo sin perturbar, con la finalidad de obtener las zonas de influencia del modelo a escala y determinar si en algún momento de las diferentes frecuencias en las que se realizaron los experimentos, las paredes de la zona de pruebas tenían un efecto sobre la dinámica del aire.

El modelo a escala físico de la vivienda se localizó sobre una base giratoria con capacidad para cambiar la altura en la que el modelo se encontraba con respecto a las paredes del túnel, se determinó que debido a las dimensiones del modelo sería necesario subir 0.40 metros sobre la base inferior del túnel aerodinámico. En esta posición se mantiene una velocidad uniforme sin los efectos de las paredes hacia el modelo, es posible observar también el experimento a través de las mirillas donde se instaló una cámara de alta velocidad.

En ninguno de los casos en que se operó el túnel de viento, no se registraron perturbaciones significativas en la magnitud de velocidad dentro de la zona de pruebas, en el rango de frecuencias entre 0 y 35Hz, lo que permitió obtener la reproducibilidad de los experimentos.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo las simulaciones físicas se realizaron previamente mediciones con una estación climatológica instalada en las instalaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana con el propósito de conocer la dirección del viento dominante en un histórico de un año, también se verificó que los datos obtenidos del equipo calibrado tuvieran coincidencias con la información reportada por estaciones cercanas a la unidad instalada a fin de

validar los datos obtenidos y calcular de esta forma el perfil de velocidad para una zona urbana de Azcapotzalco.

Posteriormente de establecida la velocidad promedio al momento de realizar las pruebas, se utilizaron los criterios de similitud para determinar la frecuencia en la que es necesario operar el túnel de viento, el cual fue de 10 Hz. En esta frecuencia es posible mantener una velocidad constante de $2.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, con respecto a la temporada en la cual se realizaron los experimentos.

El túnel aerodinámico se arranca 30 minutos antes de comenzar las pruebas para obtener un flujo uniforme dentro del laboratorio de bioclimática, también se revisan los instrumentos de la estación que estén en operación y se toman las lecturas en la bitácora de operación. Durante ese tiempo se revisa que no existan elementos que puedan afectar con el perfil de velocidad o alguna sección del túnel que pueda requerir de mantenimiento, se enciende la maquina generadora de humo, el sistema de iluminación, se coloca la base giratoria en la zona de pruebas y se acopla el modelo físico a escala, posteriormente se revisa que los resultados entre la primera medición de la estación no sea muy diferentes con los que se registran antes de tomar las mediciones previas a iniciar el ensayo.

Los datos de la prueba se presentan a continuación en la siguiente tabla de datos:

Tabla 1 Principales variables obtenidas con la estación climatológica en la UAM Azcapotzalco.

Variable	Magnitud
Temperatura media normal	17.7 °C
Temperatura mínima normal	10.2 °C
Precipitación normal	784.0 mm
Evaporación total normal	1719.9 mm
Magnitud de viento	$2.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Presión atmosférica	759 mm Hg

Una vez comenzado, se ajusta la frecuencia del variador de velocidad de los ventiladores del túnel aerodinámico y se instala la cámara de alta velocidad y se comienza a grabar la visualización.

Al momento de realizar la visualización es necesario determinar las zonas que se van a iluminar, para dibujar la malla y poder localizar el modelo en las diferentes posiciones para medir. Es necesario mantener un flujo constante en la generadora de humo, la cual se encuentra en la región cercana a los enderezadores de flujo para mandar un volumen de aire constante en la visualización.

Actualmente, es posible mantener un flujo constante debido a que se reviso continuamente para un amplio rango de frecuencias, la relación del porcentaje de humo que la maquina debía generar.

Debido a que la fuente de iluminación tiene una intensidad lumínica constante, es necesario determinar la distancia hacia el modelo con el fin de que la iluminación tenga la suficiente intensidad para iluminar el plano y realizar una visualización

apropiada y el calor generado no afecte al modelo a escala de acrílico.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del trabajo con el túnel aerodinámico, la máquina generadora de humo, el sistema de iluminación para obtener el comportamiento del viento alrededor de un prototipo de vivienda urbana.



Figura 2 Primera imagen del patrón de flujo antes de llegar a la pared frontal de la vivienda.

En la Figura 2 se muestra un plano paralelo a la dirección de flujo en la región derecha de la vivienda. En un instante, se muestra que la cantidad de humo no cubre completamente el volumen de la zona de prueba. Esta condición nos permite conocer el comportamiento del aire en la primera mitad de la figura, en donde el flujo interactúa con la superficie inferior y choca con la pared frontal de la vivienda.

Dentro de esta primera mitad, se propone la división de tres regiones, una inferior, hasta la mitad de la altura de la vivienda a todo lo largo del volumen antes de llegar a pared frontal. Una segunda región llamada intermedia y finalmente la tercera zona que está por encima de la vivienda.

En la región inferior del volumen de control, el flujo interactúa con la base giratoria y se observa la formación de dos vórtices antes de llegar a la pared frontal de la vivienda. Esta estructura separa el flujo en dos direcciones, una dirección descendente que promueve la formación de los vórtices, los cuales al interactuar con la base se muestra también presentan sentido de giro opuestos entre ellos.

La región inferior forma un escalón para que el flujo con dirección ascendente cambie rápidamente su dirección hacia la cubierta superior de la vivienda. Esta interacción entre la zona inferior e intermedia influye sobre el flujo de la región superior y modifica su dirección original hacia arriba. En la segunda región, llamada intermedia el flujo choca con la pared frontal y puede tomar dos direcciones, la primera hacia arriba y la segunda en dirección descendente.

La masa de aire de la región intermedia puede también dirigirse en direcciones alrededor de toda la pared frontal, es decir hacia arriba preponderante, hacia abajo para formar parte de uno de los vórtices de la zona inferior, a la derecha o izquierda del modelo.

Aún cuando el flujo tiene preferencia en dirección ascendente, debido a la interacción con el supuesto escalón que se forma en la región inferior, el flujo se reparte en tres direcciones ascendentes,

debido a la distribución de presión total sobre la superficie de la pared frontal.

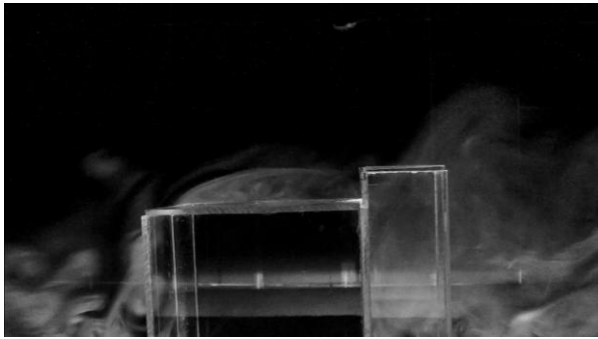


Figura 3 Segunda imagen del patrón de flujo en los alrededores de la cubierta superior de la vivienda.

En la Figura 3 se presenta una segunda región de estudio, que se encuentra sobre la cubierta superior de la vivienda y que también considera la región del cubo de las escaleras, que se encuentra en la parte inferior del modelo a escala.

En esta región se observa la formación de tres vórtices, el primero se forma del desprendimiento del flujo con dirección ascendente proveniente de la primera región y que al momento de tocar la unión de dos cubiertas, el flujo se despegue de la superficie de la vivienda. El flujo tiene una componente ascendente, sin embargo la región en donde el flujo tiene en apariencia, una zona de flujo estancado, en realidad este flujo se mueve con una magnitud directamente proporcional con la velocidad del viento dominante, es decir que obtiene la energía cinética de la interacción entre las paredes y la energía inherente.



Figura 4 Patrón de flujo en los alrededores de la cubierta superior de la vivienda.

La Figura 4 muestra la segunda región del estudio, donde también se halla la cubierta superior de la vivienda y del cubo de las escaleras, también se reconoce el comportamiento del flujo una vez pasado el volumen de la vivienda.

Una vez que el aire pasa por encima de la cubierta superior, el flujo se separa en dos, el flujo que forma una dirección ascendente y finalmente descendente en forma de parábola para llegar a la pared posterior de la vivienda donde se altera la dirección. En ocasiones es posible mostrar la formación de vórtices consecutivos como en una formación similar al de un camino de Kármán.

En flujo que queda por debajo de la parábola que forma el flujo con una dirección inicialmente ascendente, forma hasta tres vórtices que interactúan muy rápidamente, esta zona se puede considerar una región de alta turbulencia, la altura de la parábola es inversamente proporcional con la magnitud de velocidad del aire.

Cuando el flujo cambia su dirección, se va descomponiendo y forma una estructura difícil de prever y turbulenta.

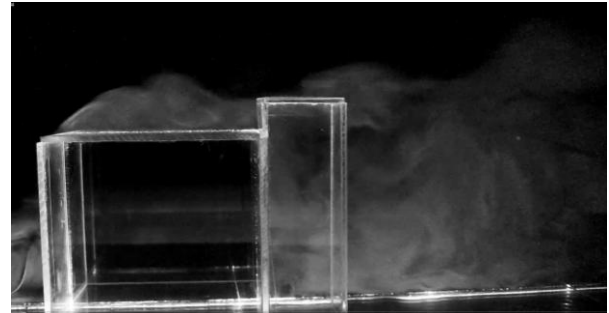


Figura 5 Patrón de flujo en los alrededores de la cubierta superior y posterior de la vivienda.

Para complementar la visualización del flujo en la zona anterior a la pared posterior del modelo de vivienda, la Figura 5 muestra un segundo instante de la interacción del flujo con la envolvente de la vivienda.

Cuando el flujo pasa por la cubierta superior a una velocidad mayor, la parábola tiene una mayor altura y el flujo es más caótico.

Al analizar el comportamiento del viento junto al cubo de las escaleras es necesario destacar que existe una importante influencia de este cubo sobre el aire.

Cuando el aire tiene una dirección descendente comienza a interactuar con la cubierta superior y con la pared frontal del cubo de las escaleras, esta interacción actúa como un turbulizador del viento.

El efecto que puede causar este incremento en la turbulencia sobre una ventana localizada en la pared posterior puede ser útil debido a que el flujo tenderá a entrar a la vivienda, por lo que puede utilizarse como entrada de aire y utilizar enderezadores o deflectores para controlar la cantidad de aire.

Las perturbaciones del flujo hacia los elementos arquitectónicos cercanos a la vivienda se dan principalmente desde la pared posterior. Los efectos de esta perturbación hacia alguna vivienda pueden ser muy importantes excepto si son contiguas, por ejemplo, en caso de que el cubo de escaleras sea compartido entre las dos casas, el efecto estaría limitado únicamente a la cubierta superior.

Hacia las paredes laterales de la vivienda, el efecto es de una vez el ancho de la vivienda, por lo que en caso de que no existan viviendas que colinden con estas paredes el efecto sería mínimo.

Con respecto a la aerodinámica de la vivienda, se considera que la envolvente no tiene elementos que favorezcan hacia el aprovechamiento de la energía del viento. Tampoco se aprecia que la vivienda este orientada bajo ningún criterio de ahorro de energía solar evidente. La disposición horizontal de la cubierta

superior tampoco es óptima para algún tipo de estrategia de ventilación o control de la temperatura al interior.

CONCLUSIONES

El presente trabajo permite llevar a cabo un estudio de visualización para estudiar las singularidades del flujo alrededor de un prototipo a escala de vivienda a través de un método experimental basado en un túnel aerodinámico y una novedosa técnica de visualización de gran portabilidad y facilidad de operación en una instalación caracterizada y completamente instrumentada.

Se observó que en el movimiento del aire es posible reconocer patrones característicos previamente reportados en la literatura especializada como vórtices, zonas de estancamiento, la turbulencia y cambios en la dirección del fluido con gran precisión (Klar et al., 2011).

Mediante el uso de esta técnica es posible evaluar el desempeño aerodinámico de una edificación como objetivo pero con un potencial hacia diferentes áreas de conocimiento debido a la integración de conocimientos entre la Ingeniería y la Arquitectura.

Se considera indispensable continuar el estudio del viento en el interior de la vivienda y evaluar algunos elementos del exterior como ventanas, puertas y texturas de los materiales para conocer el efecto que pueden tener sobre la primera evaluación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido para la realización de los experimentos físicos a los Departamentos de Medio Ambiente de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, al Departamento de Materiales y al Departamento de Sistemas de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las becas otorgadas a los estudiantes de posgrado así como el apoyo económico a través del Sistema Nacional de Investigadores.

REFERENCIAS

- FORBES, G. S. & BRACKETT, F. P. 1931. Automatically constant monochromatic illumination from a spark source. *Journal of the American Chemical Society*, 53, 3973-3976.
- KANG, J. H. & LEE, S. J. 2008. Improvement of natural ventilation in a large factory building using a louver ventilator. *Building and Environment*, 43, 2132-2141.
- KLAR, J. U., BREITSAMTER, C., HICKEL, S. & ADAMS, N. 2011. Integrated Experimental-Numerical Analysis of High-Agility Aircraft Wake Vortex Evolution. *Journal of Aircraft*, 48, 2050-2058.
- MEZA, A. F. 2008. Caracterización del comportamiento del túnel aerodinámico del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana: como herramienta para estudios de modelos arquitectónicos. Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana.
- SUN, Y. G. & ZHANG, Y. H. 2007. An overview of room air motion measurement: Technology and application. *Hvac&R Research*, 13, 929-950.
- UPP, E. L. 2002. *Fluid Flow Measurement A practical guide to accurate flow measurement*, Woburn, Gulf Professional Publishing.
- VELÁZQUEZ SOTO, J. M. 2012. Análisis físico y numérico del comportamiento del flujo de aire de un edificio. Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana.
- VOLPE, J. A. & SETTLES, G. S. 2006. Laser-induced gas breakdown as a light source for schlieren and shadow-graph particle image velocimetry. *Optical Engineering*, 45.